



Filipe Jorge Galego de Almeida

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Contributo para o estudo da eficiência e aplicabilidade de geradores termoelétricos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Dr. João José Lopes de Carvalho, Professor Auxiliar,
Universidade Nova de Lisboa - Faculdade Ciências e
Tecnologia

Júri

Presidente: Professor Doutor António José Freire Mourão
Arguente: Professor Doutor José Almeida Dias
Vogal: Professor Doutor João José Lopes de Carvalho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Estudo da eficiência e aplicabilidade de geradores termoelétricos

Copyright © Filipe Jorge Galego de Almeida, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor João Lopes de Carvalho, por me permitir realizar este trabalho autoproposto.

Gostaria também de agradecer a todos os professores que contribuíram para a minha formação académica até este momento, com especial atenção aos que me acompanharam durante a realização desta dissertação.

Um obrigado aos meus familiares, principalmente aos meus pais, pelo apoio incondicional que me permitiu construir o meu próprio caminho. Um outro obrigado a todos os meus amigos que me acompanharam, apoiaram e motivaram ao longo destes 5 anos.

Por fim, muito obrigado à Faculdade de Ciências e Tecnologia por todo o apoio à minha formação.

RESUMO

A indústria dos módulos termoelétricos está a crescer a um ritmo elevado e procura reduzir os enormes gastos e desperdícios energéticos. No entanto, um dos maiores travões deste progresso é a falta de informação e divulgação.

Foi criada uma montagem para testar a viabilidade do uso destes módulos entre uma fonte de calor e a temperatura ambiente. A fonte de calor na montagem foi vapor de água e foram utilizados módulos de baixa gama. A montagem inclui dissipadores de calor para promover a transferência de calor com o ambiente. Foram registadas as tensões, correntes e temperaturas durante o varrimento por um reóstato com o intuito de calcular a potência máxima, resistência interna e eficiência de 4 módulos na montagem com e sem convecção forçada. Foi também estudado, com a substituição por uma resistência fixa, o regime transitório do aquecimento da montagem.

Na montagem com convecção natural, o gerador composto por 4 módulos alcançou uma potência de 0.028 W (0,17% eficiência) enquanto que com convecção forçada gerou 0.397 W (0,77% eficiência). A resistência interna medida foi $17,79 \pm 0,03\Omega$. Para um módulo a resistência interna foi $4,69 \pm 0,3\Omega$.

No estudo do regime transitório existiu um pico de potência, o que sugere que seja necessária proteção eletrónica durante o arranque de um gerador.

Estes resultados sugerem que o uso destes geradores para a recuperação de calor residual é economicamente viável mesmo com baixas diferenças de temperatura. O custo elevado dos módulos é compensado pelo seu enorme tempo de vida.

Palavras-chave: Gerador termoelétrico; Recuperação de calor residual;

ABSTRACT

The industry of thermoelectric modules is searching to reduce the current energetic waste and its costs. It's a fast growing industry, however one of the biggest hampers of this growth is the lack of information.

An experiment was created to test the feasibility of the use of these modules between a heat source and ambient temperature. The heat source in this case was steam and low quality modules were used. The experiment had heat exchangers to promote the heat transfer to the environment. Voltage, current and temperatures were registered while executing a sweep through a rheostat in order to calculate the maximum power, the internal resistance and the efficiency of the modules. Experiments with natural and forced convection were conducted. The transient state of the heating of the experiment was also studied, but with a fixed resistance.

In the experiment with natural convection, a thermoelectric generator with 4 modules produced 0.028W (0,17% efficiency) while in the experiment with forced convection the generator produces 0.397 W (0,77% efficiency). The internal resistance measured was $17,79 \pm 0,03\Omega$. For a single module the internal resistance was $4,69 \pm 0,3\Omega$.

In the transient state study a power spike occurred. This suggests that electronic protection may be needed during the initial heating of an thermoelectric generator.

This results also suggest that the use of these generators for waste heat recovery is economically feasible even with low temperature differences. The high cost of the modules is compensated by their extremely long lifetime.

Keywords: Thermoelectric Generator; Waste Heat Recovery;

ÍNDICE

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Glossário	xvii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
2 Estado de Arte	5
2.1 Materiais Semicondutores	5
2.2 Energias Renováveis	8
2.3 Geradores Termoelétricos	10
2.4 Aplicações e Durabilidade	14
2.5 Gestão energética	17
3 Materiais e Métodos	19
3.1 Materiais	19
3.1.1 Módulo Peltier SP1848	19
3.2 Método Experimental	20
3.2.1 Preparação	20
3.2.2 Condições Iniciais	23
3.2.3 Verificação	25
3.3 Experiências	26
3.3.1 Experiências com medição do regime transitório	26
3.3.2 Experiências com Reóstato	28
4 Resultados	29
4.1 Experiências do regime transitório	29
4.2 Resistência térmica equivalente	31
4.2.1 Experiência 1	31
4.2.2 Experiência 2	33
4.3 Experiências com Reóstato	36
4.4 Eficiência	40

5	Discussão de Resultados	41
5.1	Experiências com Regime Transitório	41
5.1.1	Experiência 1	41
5.1.2	Experiência 2	42
5.1.3	Experiência 3	43
5.2	Experiências com o Reóstato	44
5.2.1	Experiências com 1 módulo	44
5.2.2	Experiências com 4 módulos	45
6	Aplicações	47
6.1	Levantamento de produtos no mercado	47
6.2	Potenciais locais de instalação	49
6.3	Caso de estudo	49
7	Conclusão	55
7.1	Trabalhos Futuros	56
	Referencias Bibliográficas	57
I	Código Arduino	61
II	Lista de Materiais	63

LISTA DE FIGURAS

2.1	Configuração atômica da estrutura cristalina de Silício[2]	6
2.2	Configuração atômica da estrutura cristalina de Silício dopada de Fósforo[2]	6
2.3	Níveis de energia para os materiais tipo <i>P</i> e <i>N</i>	7
2.4	Representação de corrente criada num par <i>PN</i> [6]	8
2.5	Progressão da eficiência de células solares[9]	9
2.6	Especificações da identificação internacional de módulos de Peltier[12]	10
2.7	Modelo de funcionamento de um GTE[6]	11
2.8	Eficiência de diferentes alhetas rectilíneas[14]	12
2.9	Eficiência de diferentes alhetas circulares[14]	13
2.10	Vista explodida de um Modelo de um módulo termoeletrico	14
2.11	Eficiência energética para módulos com diferentes valores de <i>ZT</i> [17]	15
2.12	Esquema de ligação de um GTE à rede elétrica	18
3.1	Módulo termoeletrico	19
3.2	Especificações do Módulo Peltier SP1848[25]	20
3.3	Tensão e Corrente de 1 módulo em função da diferença de temperatura	20
3.4	Esquema das ligações Arduino-Termopares	21
3.5	Montagem experimental	22
3.6	Esquema de montagem experimental 1 com dimensões em <i>mm</i>	22
3.7	Revestimento isolante da panela e fogão	23
3.8	Esquema das ligações dos Multímetros	23
3.9	Esquema das condições iniciais da montagem experimental sem ventoinha	24
3.10	Esquema das condições iniciais da montagem experimental com ventoinha	24
3.11	Distribuição da temperatura, em graus Celsius, ao longo do Cartão	25
3.12	Esquema de montagem experimental 2	26
3.13	Esquema das ligações da ventoinha e voltímetro na montagem com retroalimentação	27
4.1	Diferença de temperatura do ar e tensão em função do tempo na experiência 1	29
4.2	Diferença de temperatura do ar e tensão em função do tempo na experiência 2	30
4.3	Diferença de temperatura do ar e tensão em função do tempo na experiência 3	30
4.4	Esquema de montagem experimental 1 com dimensões em <i>mm</i>	31
4.5	Esquema das resistências da experiência 1	31

4.6	Tabela de estimativas de coeficientes de convecção. [26]	32
4.7	Esquema das resistências da experiência 1	33
4.8	Esquema da área útil de uma ventoinha com dimensões em <i>mm</i>	34
4.9	Potência, de um módulo, em função da tensão gerada com convecção natural .	36
4.10	Potência, de um módulo, em função da tensão gerada com convecção forçada	36
4.11	Potência, de 4 módulos em série, em função da tensão gerada com convecção natural	37
4.12	Potência, de 4 módulos em série, em função da tensão gerada com convecção forçada	37
4.13	Potência, de 1 módulo, em função da Resistência na experiência com convecção natural	38
4.14	Potência, de 1 módulo, em função da Resistência na experiência com convecção forçada	38
4.15	Potência, de 4 módulos em série, em função da Resistência na experiência com convecção natural	39
4.16	Potência, de 4 módulos em série, em função da Resistência na experiência com convecção forçada	39
5.1	Diagrama da distribuição de temperaturas ao longo do módulo, em regime transitório.	42
6.1	Tabela com o preço médio do kW por ano em alguns países da zona europeia[32]	51
6.2	Custo do kW em função do tempo de operação do gerador a um $\Delta T \approx 21$. A linha tracejada a vermelho representa o preço médio europeu do kW em 2017.	52
6.3	Custo do kW em função do tempo de operação de diferentes módulos a um $\Delta T = 65$. A linha tracejada representa um módulo de qualidade superior num $\Delta T = 100$ [29]	52
I.1	61
I.2	62
I.3	62

LISTA DE TABELAS

4.1	Tabela de valores usados para o cálculo da resistência equivalente	32
4.2	Tabela de temperaturas, Resistências equivalente para as diferentes experiências realizadas.	35
4.3	Potências Elétricas e Eficiências para cada experiência.	40
6.1	Tabela de características dos diversos módulos termoeletricos, para geração elétrica, disponíveis no mercado.	48

GLOSSÁRIO

α coeficiente de Seebeck.

Ω Ohm.

η eficiência.

ΔT Diferença de Temperatura.

A Área.

C Graus Centígrados.

GTE Geradores Termoelétricos.

N Material Semicondutor Negativo.

P Material Semicondutor Positivo.

R Resistência Elétrica.

T Temperatura.

V Tensão.

W Watt.

Wh Watt hora.

ZT Figura de mérito adimensional.

e espessura.

h Coeficiente de Convecção.

k Condutividade Térmica.

q Fluxo de Calor.

INTRODUÇÃO

O movimento mundial para tornar o uso de energias sustentáveis a base da produção de energia elétrica tem vindo a crescer exponencialmente nos últimos anos. A revolução tecnológica marcou o início de um crescimento tecnológico incomensurável. Ou seja, juntamente com o aumento da população veio o aumento do uso de tecnologias pessoais que necessitam de energia elétrica (Telemóveis, Computadores, Câmaras, etc.) o que, por sua vez, levou a um crescimento ainda maior do setor da produção de energia.

A facilidade e rentabilidade de expandir ou replicar as tecnologias, inicialmente desenvolvidas para a geração de energia elétrica, juntamente com a falta de estudo das consequências do uso das mesmas levou a um crescimento insustentável do setor energético. Embora exista uma certa relutância política relativamente ao aquecimento global, o apoio da comunidade científica é cada vez maior e a construção de sistemas energéticos renováveis com o intuito de substituir os atuais sistemas baseados em energias “sujas” é cada vez mais frequente, mas este não é o único aspeto que tem de sofrer alterações.

De modo a rentabilizar e reduzir o impacto ambiental de diversas indústrias, sistemas de transporte e habitações é necessária uma abordagem no sentido de melhorar a sua eficiência energética. Ou seja, para além da substituição das fontes energéticas é necessária uma redução do consumo. No entanto, a redução do consumo não passa apenas por melhorar a eficiência dos processos envolvidos nas diferentes indústrias e setores. É fulcral uma alteração das mentalidades e hábitos dos produtores e consumidores. A substituição em vez da reparação, a criação de produtos com baixo tempo de vida e a aquisição excessiva de bens são exemplos de más práticas.

Atendendo a estas preocupações, não só o uso, mas também os investimentos para avanços tecnológicos das energias renováveis devem ser privilegiados.

Para que a leitura desta dissertação seja facilitada é feito, de seguida, um breve enquadramento do que será referido em cada parte do documento.

Portanto, num subcapítulo inicial são abordados os materiais semicondutores com o intuito de entender o processo físico que permite a existência destes módulos. De seguida, para enquadrar a capacidade de geração de energia dos módulos termoeletricos, estes são comparados com processos de produção de energia renovável com aspetos de funcionamento semelhantes.

Ainda dentro do enquadramento teórico, no subcapítulo de geradores termoeletricos faz-se referência, não só às fórmulas que regem a transferência de calor, mas também às vantagens e desvantagens do uso deste tipo de gerador. Neste subcapítulo são também realizados exemplos de aplicações e a importância de dissipadores de calor.

A introdução teórica finaliza com uma breve passagem sobre a gestão da energia elétrica proveniente destes módulos e alguma informação teórica necessária para projetar um gerador.

Depois da introdução teórica é apresentado um capítulo de materiais e métodos onde as experiências são descritas da maneira mais científica possível. Os resultados e posterior discussão dos mesmos são apresentados no capítulo seguinte.

No último capítulo, antes da conclusão, são relacionados os resultados desta experiência com a informação recolhida e é feito um caso de estudo com vista a calcular e comparar o preço da eletricidade gerada e avaliar a viabilidade, promovendo o investimento nesta tecnologia. Neste capítulo é também apresentado um estudo de mercado e alguns dos potenciais locais de instalação.

1.1 Objetivos

O presente trabalho surge com intuito de estudar, em maior detalhe, a viabilidade da aplicação de módulos termoelétricos para o aproveitamento energético.

Em suma, a dissertação visará avaliar a aplicabilidade de um gerador termoelétrico em diversos sistemas com o propósito de melhorar a sua eficiência energética.

Para tal, procedeu-se à construção de um modelo experimental com o intuito de simular uma condição de funcionamento e obter medições que permitam quantificar a viabilidade do uso deste gerador.

O objetivo mais genérico é a promoção de eficiência energética para que possa existir um crescimento sustentável da produção energias. Porém, objetivos mais específicos foram estabelecidos para melhor organização deste trabalho. Estes são:

1. Execução de uma montagem experimental com vista a monitorizar a resistência interna e potência de um gerador.
2. Estudo do funcionamento de um gerador em regime transitório e avaliação das condições de funcionamento e métodos de instalação do gerador.
3. Levantamento de informação relevante sobre os módulos atualmente comercializados no mercado.
4. Elaboração de um caso de estudo para a avaliação económica deste gerador com vista a realçar o tempo de retorno do investimento inicial da instalação.

É importante referir que a avaliação económica dos geradores terá como principal contraponto a operação dos mesmos em gradientes térmicos reduzidos. Ou seja, serão estudadas as possibilidades do uso destes geradores longe das condições ideais a que estes são testados.

ESTADO DE ARTE

2.1 Materiais Semicondutores

Antes de abordar os geradores, há que entender o cerne do seu funcionamento e para tal é necessário entender o princípio físico que leva à criação da energia em si.

A condutividade elétrica é a facilidade com que um material é capaz de conduzir corrente elétrica. Isto traduz-se na facilidade que os eletrões têm de chegar à banda condutora. Segundo a teoria das bandas, os materiais metálicos têm a sua banda condutora e de valência sobrepostas permitindo uma passagem facilitada dos eletrões. No entanto, em materiais semicondutores a banda de condução e a banda de valência encontram-se separadas por um hiato bastante reduzido. O nível de Fermi é o nível de energia mais alto ocupado pelos eletrões a 0 graus Kelvin. A temperaturas superiores o estado de ocupação das bandas é dado pela distribuição Fermi-Dirac[1].

Os materiais semicondutores possuem assim, uma condutividade intermédia e podem ser considerados intrínsecos ou extrínsecos. Os intrínsecos não possuem nenhum agente dopante, levando a terem uma rede cristalina onde todos os eletrões de valência estão ligados. Estes eletrões, quando excitados, podem ter energia suficiente para entrarem na banda condutora, mas ao fazerem isto deixam um “buraco”. Este “buraco” será preenchido por um eletrão que perderá energia. Este fenómeno chama-se recombinação.

Nestes materiais o fenómeno de recombinação acontece com a mesma frequência que o excitação dos eletrões. Portanto, a baixas temperaturas, onde não existe excitação, estes materiais comportar-se-ão como isolantes.

Os materiais normalmente usados para a criação destes módulos são: Silício (Si) e Germânio (Ger), já que, aquando da formação de cristais, estes possuem 4 eletrões de valência o que permite uma configuração tetraédrica onde existe a partilha de 2 eletrões de valência entre eles mesmos, como representado na figura 2.1.

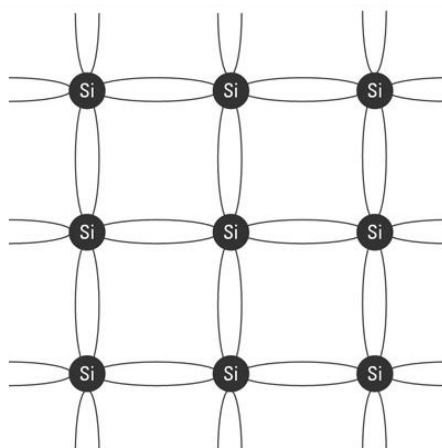


Figura 2.1: Configuração atômica da estrutura cristalina de Silício[2]

No entanto, esta estrutura não é interessante para a construção de um gerador termoelétrico. Para se tornar útil, é necessário combinar a estrutura com outros elementos denominados de dopantes. Dependendo do material adicionado, o semicondutor torna-se Positivo ou Negativo. Estes semicondutores são apelidados de extrínsecos.

Os semicondutores Negativos (*N-type*) são criados quando um material com mais elétrons de valência é adicionado à estrutura. Os dopantes mais usados são Antimônio (Sb), Fósforo (Ph) e Arsênio (As) já que possuem 5 elétrons de valência. Como observado na figura 2.3 a adição de dopante tipo *N* irá aumentar o nível de energia Fermi ficando este mais próximo do nível de energia da banda condutora. Portanto, este elétron não ligado, pode facilmente ser excitado e agir como um portador de carga.

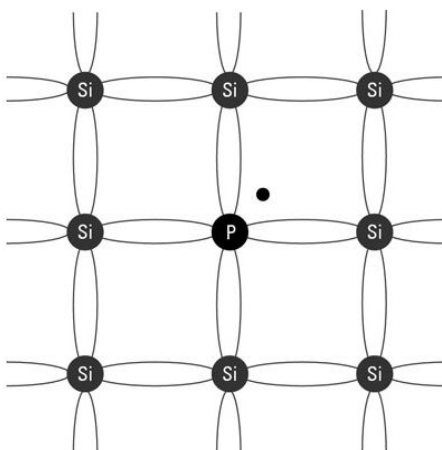


Figura 2.2: Configuração atômica da estrutura cristalina de Silício dopada de Fósforo[2]

Por sua vez, os semicondutores Positivos (*P-type*) são criados quando um material com menos elétrons de valência é adicionado à estrutura. Os dopantes mais usados são Boro (B), Alumínio(Al), Gálio(Ga) e Índio(In). Como observado na figura 2.3 a dopagem

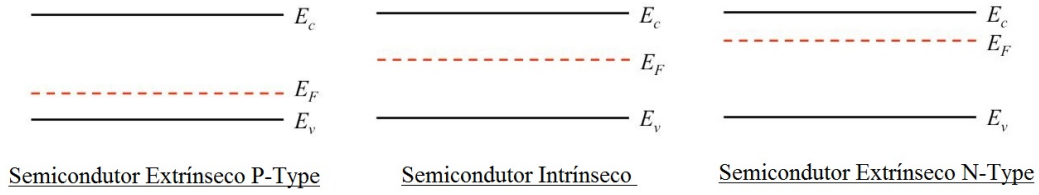


Figura 2.3: Níveis de energia para os materiais tipo P e N

desloca o nível de energia de Fermi para próximo do nível de energia da camada de valência isto permite com que os elétrons de valência sejam facilmente excitados e se desloquem para o buraco criado pela dopagem. Ao se deslocarem deixarão um buraco na sua localização anterior. O que é observado é o deslocamento do buraco e não dos elétrons. Este movimento será visto como uma partícula positiva (portador de carga)[1].

A junção de 2 materiais semicondutores de tipos diferentes origina uma diferença de potencial que funciona de acordo com o efeito *seedbeck*. Este diz que um potencial elétrico é criado da junção de materiais condutores/semicondutores quando estes são submetidos a um gradiente de temperatura[3]. Este efeito é reversível e o oposto é apelidado de efeito de *Peltier*. Este diz que um gradiente de temperatura é criado da junção de materiais semicondutores quando estes são submetidos a um potencial elétrico.

Este arranjo PN pode-se apelidar de termopar. Os termopares são usados em inúmeras aplicações domésticas e industriais e científicas como sensores[4] de temperatura de baixo custo. Já que para cada diferença de temperaturas será gerada uma voltagem que pode ser interpretada com valores tabelados. O coeficiente que define a eficiência do material a transformar calor em energia elétrica é então apelidado de *Absolute Seedbeck coefficient*[5].

$$\alpha = \frac{V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

As concentrações de portadores de carga em cada semicondutor têm de ser bem ajustadas, caso contrário o material poderá comportar-se como um condutor (caso exista excesso). As concentrações ideais para maximizar o coeficiente de Seedbeck já estão estudadas[1].

O fundamento físico da geração de eletricidade através destes materiais diz que os pares $P-N$ ao serem submetidos a uma temperatura elevada numa das suas faces irão excitar os seus portadores de carga deslocando-os no sentido da face de menor temperatura. Isto gerará uma corrente como representado na figura 2.4 e esta corrente por sua vez irá criar uma diferença de potencial na face fria par PN .

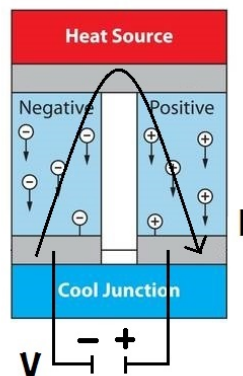


Figura 2.4: Representação de corrente criada num par PN [6]

2.2 Energias Renováveis

Os painéis fotovoltaicos têm o mesmo funcionamento base que um gerador termoelétrico. Estes são constituídos por junções PN de material semicondutor que serão excitadas de modo a produzir corrente elétrica.

A grande diferença está na natureza desta excitação. Enquanto que num gerador esta ocorre por um aumento de temperatura, nos painéis fotovoltaicos esta ocorrerá por radiação. Existirá portanto uma interação entre fóton-eletrão em vez de eletrão-eletrão.

A junção PN de cada material semicondutor produz corrente em resposta a diferentes comprimentos de onda. Portanto, uma simples junção de Silício tem eficiências a rondar os 25% e um limite teórico de 33,16%[7]. Ou seja, cada tipo de material absorve certa parte do espectro de radiação incidente.

Nos últimos anos, com o desenvolvimento de tecnologias de fabrico, as eficiências dos módulos têm vindo a aumentar como pode ser observado na figura 2.5. As células solares apelidadas de "Multi-Junction" têm eficiências bastante superiores, algumas ultrapassam os 40%, já que unem junções PN de diferentes tipos de material permitindo a absorção de uma maior amplitude de comprimentos de onda[8].

A eficiência das junções PN no aproveitamento da radiação solar supera largamente a do aproveitamento pela energia térmica. Isto indica que para a geração de energia através do sol, o uso de painéis solares fotovoltaicos é a decisão mais sensata.

No entanto, este facto não invalida o investimento na área já que o aproveitamento de energia térmica, através de junções PN , pode ser contínuo e ininterrupto contrariamente à geração de energia solar fotovoltaica.

Enquanto que os fabricantes de células fotovoltaicas procuram aumentar o espectro de absorção da radiação, os fabricantes de células termoelétricas procuram materiais capazes de resistir a temperaturas extremas sem perder as suas propriedades físico-químicas e consequentemente a sua eficiência na conversão de energia. Esta diferença levou a uma

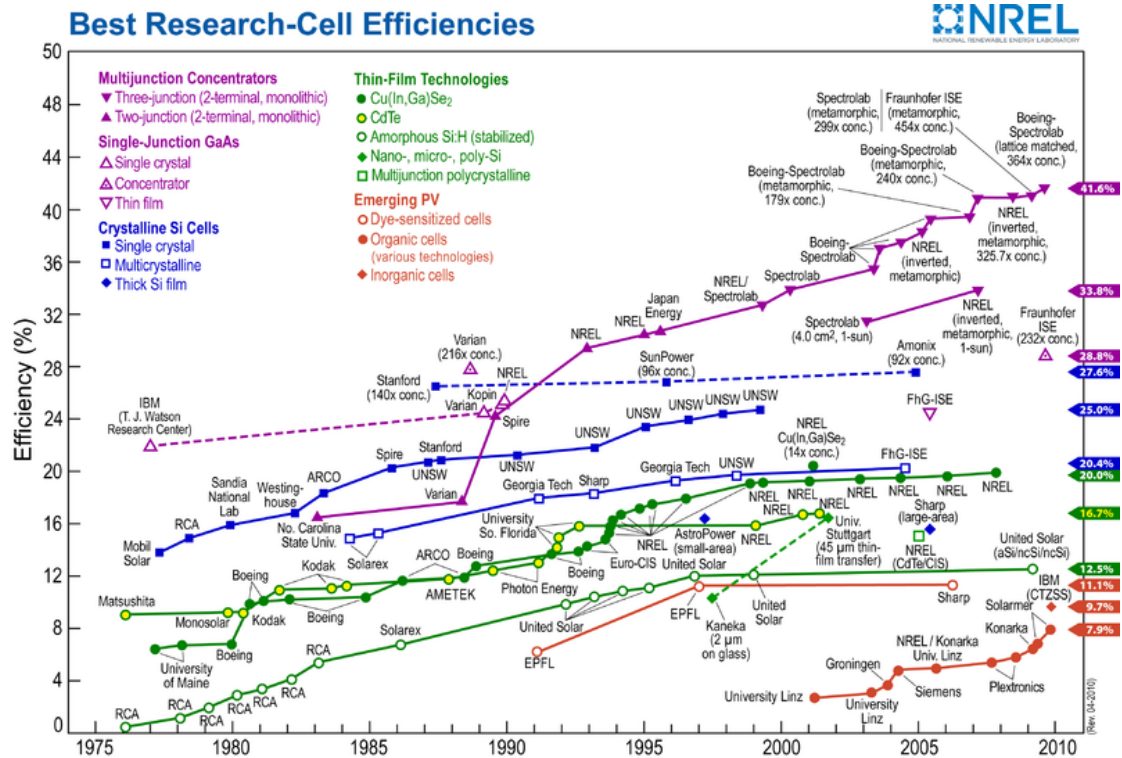


Figura 2.5: Progressão da eficiência de células solares[9]

divergência nas tecnologias no desenvolvimento dos módulos termoeletrônicos comparativamente aos fotovoltaicos.

Em termos de geração de energia elétrica em grande escala através de uma fonte térmica, as centrais geotérmicas têm um enorme potencial e são a escolha mais acertada.

O funcionamento destas centrais baseia-se na perfuração de 2 buracos numa zona geologicamente ativa. Por sua vez, será injetado um fluido num destes buracos e este sairá do buraco oposto em forma de vapor ou com grande poder calorífico, como pode ser visto na figura ?? . Este vapor servirá para mover uma turbina, ou seja, existe primeiramente a conversão em energia mecânica e só em seguida a conversão em energia elétrica.

Devido às características geométricas de um gerador termoeletrônico, o aproveitamento energético destas zonas seria muito pouco eficiente comparativamente ao de uma central geotérmica, já que é bastante difícil gerar um diferencial térmico acentuado.

No entanto, em sistemas de menor dimensão onde a instalação de uma turbina é inviável, os módulos de pares P-N podem ser uma escolha a tomar. De notar que uma central geotérmica também liberta, através do seu sistema de refrigeração, enormes quantidades de calor que não são aproveitadas. A combinação dos 2 sistemas pode impulsionar largamente a produção de energia geotérmica.

2.3 Geradores Termoelétricos

De modo a alcançar um melhor entendimento sobre estes geradores é necessário aprofundar a informação relativamente à sua geometria, limites, modos de funcionamento. Para isso é necessário entender como funciona a transferência de calor.

O calor, energia térmica, é uma consequência dos movimentos microscópicos das partículas de um certo sistema ou objeto. O calor naturalmente flui de corpos mais quentes para corpos frios, aumentando a energia e quantidade de movimentos das partículas do objeto frio. Pode-se afirmar que o calor está diretamente relacionado com a entropia de um sistema.

A transferência de calor pode ser feita por condução, convecção ou radiação e todos estes fenómenos são regidos pela 1ª lei da termodinâmica e a lei de conservação de energia. A lei de condução de Foureir diz que:

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

onde k (W/m.K) representa a condutividade térmica do material e é praticamente constante se o material for homogéneo [10].

Já foi reconhecido experimentalmente que a condutividade térmica é dependente da temperatura, embora não haja nenhuma teoria universal que explique este comportamento de dependência. Algumas fórmulas e valores para diferentes materiais foram alcançados experimentalmente[11].

A lei de convecção de Newton (Lei de arrefecimento) diz que:

$$q_{conv} = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (2.3)$$

onde h (W/m².K) é o coeficiente de transferência por convecção[11][10].

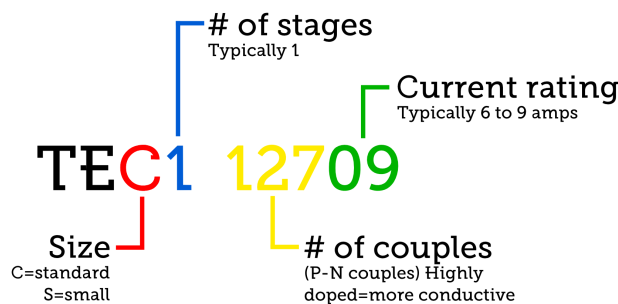


Figura 2.6: Especificações da identificação internacional de módulos de Peltier[12]

Na conversão de calor em energia elétrica normalmente está associado a transformação intermédia em energia mecânica, mas graças aos módulos PN , este passo intermédio pode ser removido do processo.

Os módulos comerciais de material semicondutor são geralmente quadrados e são cobertos de um material cerâmico de modo a conferir uma excelente resistência mecânica. Este material cerâmico é capaz de suportar as altas temperaturas a que os módulos são sujeitos e em alguns casos também é usada resina *epoxy* para ajudar a selar esta cobertura cerâmica.

Existe uma norma internacional de identificação dos mesmos, como pode ser vista na figura 2.6.

Esta norma é pouco respeitada já que os produtores começaram a criar módulos com diferentes especificações e propósitos. Alguns módulos são criados para suportar altas temperaturas enquanto que outros para baixas temperaturas já que o seu propósito será o arrefecimento de um meio. Certos módulos são produzidos para serem usados apenas com o intuito de gerar energia sendo que dentro desta categoria existe uma diversidade na potência, corrente e tensão que estes são capazes de gerar. Estas diferenças levaram a identificações únicas por parte de cada produtor.

Como já foi referido, são comercializados maioritariamente módulos planos de forma quadrangular, no entanto existe a possibilidade de fabricar módulos com as mais diferentes formas. Por exemplo, uma geometria tubular poderá possibilitar a instalação destes módulos em canalizações. Os custos de produção de formas mais complexas serão logicamente superiores. Algumas empresas já se encontram a desenvolver módulos com estas geometrias menos vulgares.

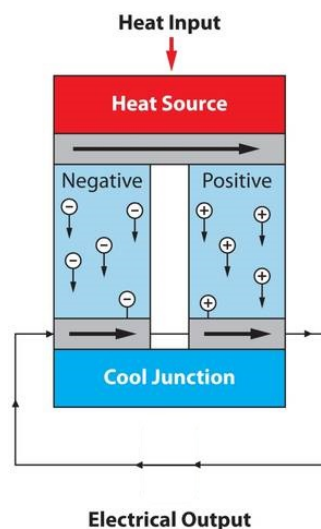


Figura 2.7: Modelo de funcionamento de um GTE[6]

Um GTE é composto por diversos destes módulos e tem um funcionamento como o descrito na figura 2.7 e para uma maximização de potência do mesmo, os módulos *PN* têm de estar dispostos termicamente em paralelo e eletricamente em série.[13]

Dentro de cada módulo cada par *N* e *P*, está ligado entre si em uma das faces do gerador e ligado ao par seguinte na face oposta como pode ser visto na figura 2.10. Deste

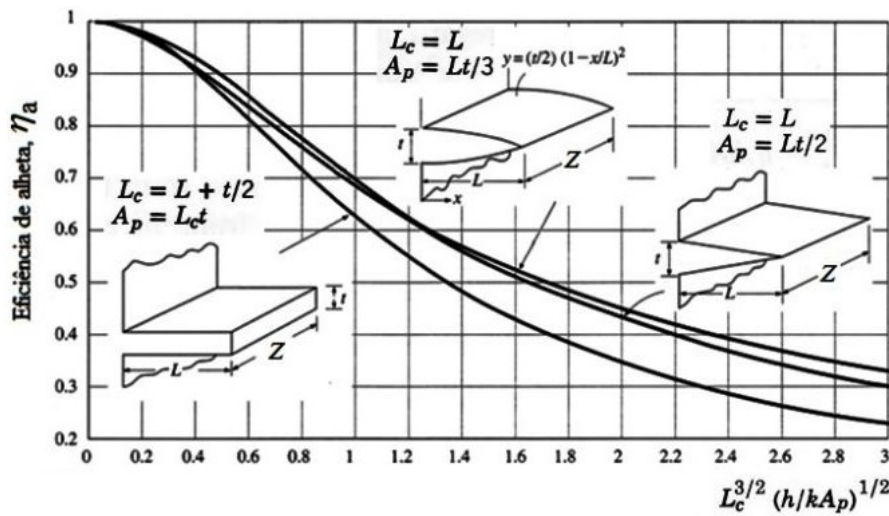


Figura 2.8: Eficiência de diferentes alhetas rectilíneas[14]

modo apenas existem ligações *PN* feitas e nunca *NN* ou *PP*.

De modo semelhante às células fotovoltaicas, a ligação de módulos *Peltier* em série, leva à soma das suas tensões, enquanto que em paralelo, leva à soma das suas correntes. A combinação de módulos em série e paralelo permite que, numa determinada condição de funcionamento do gerador, seja gerada uma tensão e corrente conveniente para os equipamentos a serem alimentados por este.

Se existir um desequilíbrio no número de módulos ligados em paralelo, o ramo da ligação com menor número de módulos irá funcionar como uma carga em vez de gerador. A inclusão de díodos ou um diferente esquema de montagem permite resolver este problema.

O uso de alhetas é a prática comum quando se quer uma transferência de calor elevada já que estas permitem, num equipamento compacto, uma área de permuta de calor muito elevada. As alhetas são produzidas de um material com boa condutividade térmica e geralmente estão equipadas com um ventilador para aumentar o coeficiente de convecção.

A geometria das alhetas tem um enorme papel na sua eficiência, como indicado na figura 2.8. Para além disso, o material das próprias alhetas e o coeficiente de convecção a que estas estão sujeitas são fatores de enorme importância. Quanto menor for o valor do coeficiente de convecção e maior o valor de condução, melhor é a eficiência da alheta.

As alhetas circunferenciais, figura 2.9, têm a sua eficiência dependente do coeficiente entre o seu raio e o raio do tubo que no qual estão instaladas. Independentemente da geometria das alhetas, quanto mais finas forem e maior a área de permuta, mais acentuada é a transferência de calor.

A integração de alhetas (dissipador de calor), em cada face do gerador, aumenta a área para a difusão de calor o que permite um gradiente térmico mais acentuado. As alhetas serão mais eficientes quando a troca de calor ocorre para um fluido com um coeficiente de

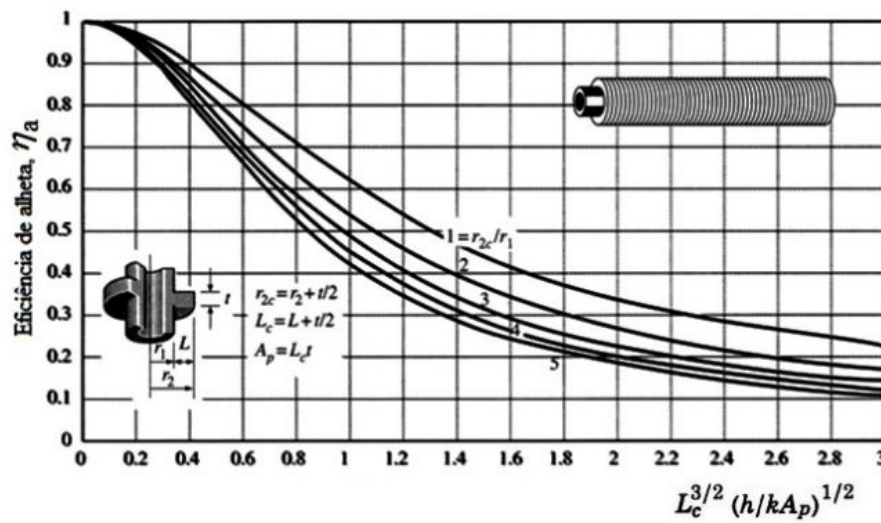


Figura 2.9: Eficiência de diferentes alhetas circulares[14]

convenção reduzido. No caso a transferência de calor ocorrer entre 2 sólidos (condução), será vantajoso o uso de uma pasta térmica entre as superfícies de modo a garantir que não existe nenhuma resistência térmica de contacto. Por mais pequena que seja a distância entre as superfícies existire sempre uma quantidade de ar que funcionará como isolante. A aplicação de pressão traz melhorias na condução do calor e já que a estrutura dos módulos é de material cerâmico, esta tem uma boa capacidade de resistir à compressão.

O toleranciamento e a carga mecânica têm influência na potência dos sistemas. Um mau toleranciamento e um défice de pressão podem reduzir substancialmente a potência de um módulo num determinado equipamento. O toleranciamento tem de ter em conta a dilatação térmica dos mesmos e do sistema em que irão operar.

A reversibilidade do princípio físico significa que aquando da aplicação de uma corrente elétrica no gerador este funciona como uma bomba de calor, criando um gradiente de temperatura que irá extrair o calor de um meio, como descrito no efeito de Peltier. Pode-se referir como um arrefecimento termoelétrico[15]. Isto pode traduzir-se num argumento a favor dos equipamentos possuírem um GTE, estes tanto podem gerar um potencial elétrico do calor emanado como podem ser arrefecidos muito rapidamente.

Já que o gerador não possui nenhum componente móvel, a manutenção é nula ou muito reduzida, o que leva a um tempo de vida muito extenso caso as normais de manuseamento sejam cumpridas. Algumas empresas reportam um tempo médio entre falhas de 200.000 horas. No entanto, estas não são as únicas vantagens, o funcionamento também é independente da escala, direção e posição dos módulos.

Os maiores impedimentos do desenvolvimento destes geradores são a baixa eficiência e o custo elevado dos módulos. Para ultrapassar esta barreira, os investigadores estão à procura de materiais de menor custo e que sejam capazes de suportar maiores temperaturas.

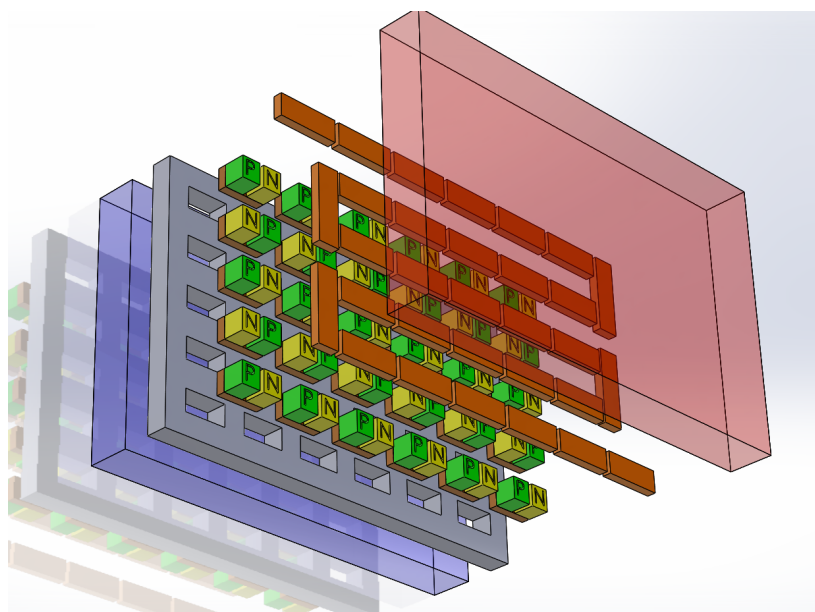


Figura 2.10: Vista explodida de um Modelo de um módulo termoeletrico

Um número adimensional usado para caracterizar os módulos de materiais quanto à sua qualidade e potência é o ZT ("dimensionless figure of merit") [16], onde T é a temperatura média entre as extremidades a que o módulo é submetido e Z é:

"Z is the factor of merit of the TE materials and can be expressed as a function of the electrical resistivities ρ_p and ρ_n , the thermal conductivities k_p and k_n and the Seebeck coefficients α_p and α_n of each of the two materials of the thermocouple." [17]

Um bom material termoeletrico tem portanto, um valor de Z e coeficiente de Seebeck elevados, mantendo uma baixa condutividade térmica. A média dos valores de ZT para os módulos usados atualmente na indústria é entre 0,5 e 0,8. Esforços estão a ser feitos com o objetivo de gradualmente aumentar o valor de ZT . Quando se atingir $ZT = 2$, estes módulos serão capazes de alcançar uma eficiência de 10%, como pode ser visto na figura 2.11.

Uma disparidade de temperaturas num GTE composto por diversos módulos pode ter consequências negativas na potência que pode ser gerada, no entanto este efeito é minimizado quando os módulos se encontram ligados eletricamente em série. [13]

2.4 Aplicações e Durabilidade

As atuais aplicações desta tecnologia são bastante variadas, sendo uma das mais relevantes a da exploração espacial.

A temperatura exterior no espaço pode rondar os -200°C e isto permite gerar uma diferença de potencial com o gradiente térmico gerado entre o exterior e o calor gerado

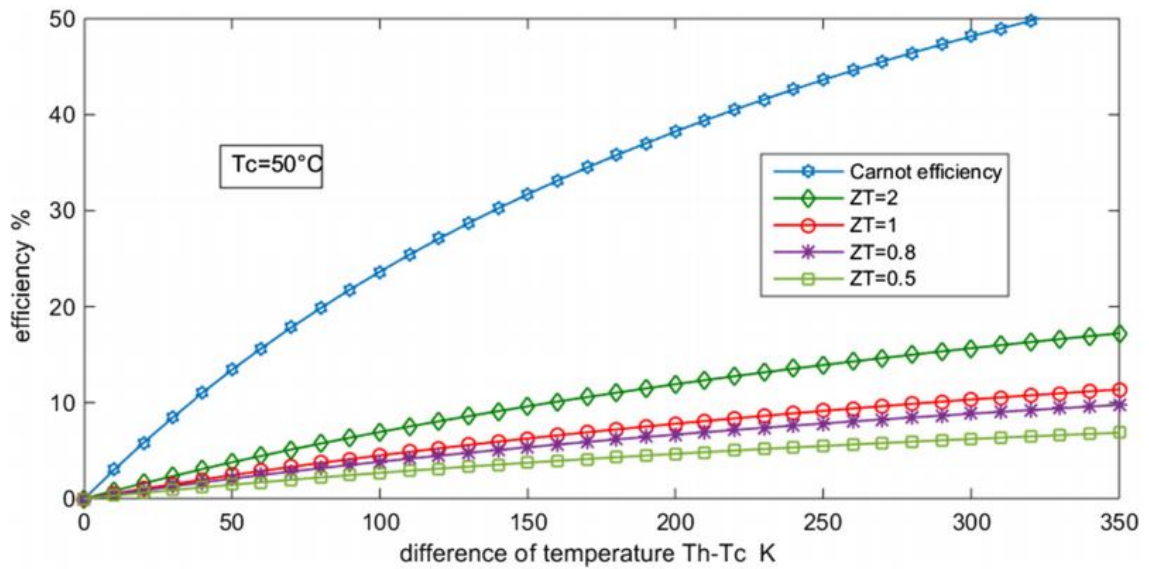


Figura 2.11: Eficiência energética para módulos com diferentes valores de ZT [17]

pelo decaimento radioativo de Plutônio-238 [18]. Algumas sondas de exploração espacial profunda, como a Voyager 1, têm um gerador destes a operar há mais de 35 anos.

No entanto, o uso desta tecnologia no espaço tem sido cada vez menor já que é necessário utilizar material radioativo e a relutância política associada à energia nuclear tem vindo a crescer imenso graças à ligação com a indústria das armas.

A inclusão de um gerador em relógios para o recarregamento da bateria interna através do calor corporal é comum. Alguns sensores e dispositivos requerem poucos miliwatts para operarem e já que o tempo de vida dos mesmos é maior que o tempo de vida de uma bateria convencional, recorre-se a um GTE, já que este ultrapassa largamente o tempo de vida de qualquer dispositivo.

As aplicações mencionadas, usam os GTEs puramente como fonte energia, mas já existem geradores direcionados para o reaproveitamento de energia.

A colocação de geradores em chaminés e fornalhas já foi simulada [19] [20]. Este sistema, altamente complexo, pode ser instalado em diversas chaminés e gerar até 136 MWh por ano.

Na indústria metalúrgica onde o desperdício de calor é mais elevado, está em prática o uso de geradores com o intuito de aproveitar o calor da radiação de lingotes incandescentes, dado que estes têm temperaturas a rondar os 900°C . Embora o custo de instalação seja elevado e o processo experimental, o aproveitamento é de uma ordem de grandeza de kW. [21].

Para ajudar na progressão desta tecnologia terão que ser realizados mais estudos sobre o retorno do investimento com o objetivo de avaliar o tempo que um gerador demorará a criar uma quantidade de energia elétrica que supere os custos da sua construção e

manutenção.

Como já foi referido, estes geradores têm tempos de vida muito longo e o seu tempo de vida normalmente ultrapassa o do equipamento em que está inserido. No entanto, a exposição dos módulos a ciclos térmicos pode levar a um decréscimo acentuado da sua vida.

Vibrações e choques mecânicos são também um fator problemático na durabilidade, mas caso os módulos se encontrem devidamente fixo, estas não devem influenciar a durabilidade. A falha de um módulo pode ser catastrófica ou por degradação, tanto um esforço ou impacto como um pico de temperatura excessivo podem causar a falha catastrófica. Ao submeter o módulo a uma temperatura excessiva, o material semicondutor pode sofrer alterações nas suas propriedades mecânicas, reduzindo as suas capacidades de geração elétrica.

A falha por degradação ocorre quando existe um aumento da resistência elétrica do módulo, esta degradação ocorre naturalmente com a alteração das propriedades dos módulos e é acelerada com os ciclos térmicos. A degradação da estrutura do módulo graças à fadiga também pode originar a sua falha.

De modo semelhante a outros processos de fadiga, a amplitude do ciclo, a frequência, o número de ciclos e a temperatura máxima de amplitude são os fatores que mais influenciam na falha precoce.

Para módulos comerciais, de baixa gama, sujeitos a ciclos térmicos entre a temperatura ambiente e um máximo de 90°C a degradação é considerada desprezável, enquanto que, para um mesmo número de ciclos, se o máximo aumentar para 150°C o módulo já sofre danos.[22]

Ciclos térmicos onde a temperatura atingida seja bastante inferior à temperatura máxima que o módulo consegue suportar podem causar uma fadiga tão reduzida que pode ser desprezada. Quando se projeta a instalação de um gerador num equipamento, os fatores acima referidos são de extrema importância para o custo, manutenção e durabilidade do mesmo.

Um outro potencial uso destes geradores, já que as suas dimensões podem ser reduzidas, é ajudar na velocidade de dissipação de calor. O gerador pode não criar um potencial elétrico muito elevado, mas será o suficiente para fazer funcionar uma ventoinha. Esta ventoinha por sua vez aumentará o gradiente de temperatura submetido no gerador e a tensão nele gerada, mantendo o funcionamento da mesma constante. Sem se fornecer energia extra ao sistema o coeficiente de convecção e por sua vez a taxa de transferência de calor foram aumentadas. Será este sistema de retroalimentação plausível?

O calor libertado no permutador de um sistema de refrigeração é geralmente desperdiçado e a quantidade de sistemas de refrigeração presentes na nossa sociedade é astronómica. No entanto, já existem bastantes sistemas de aproveitamento da energia libertada para uso interno ou de rede [23]. Estes sistemas aproveitam o calor libertado para funções como: aquecimento de águas sanitárias, climatização de interiores, lavagem de produtos, processos de secagem. Estes sistemas de aproveitamento têm as suas limitações

e o uso dos mesmos não é frequente em locais onde não é necessário o aquecimento de espaços interiores. Mesmo nestes casos, o aproveitamento é apenas parcial, levando a que grande parte da energia seja difundida para a atmosfera.

Em sistemas de refrigeração em que o condensador esteja projetado para operar com um ΔT elevado, pode ser viável a instalação de um GTE. Isto pode significar uma redução considerável do consumo energético do mesmo, mas é importante referir que a adição de novos componentes a um sistema aumenta a complexidade do mesmo. Este aumento de complexidade pode levar a que um permutador de calor com as mesmas especificações ocupe mais espaço.

A existência de um outro sistema de aproveitamento não invalida a instalação de um GTE. A combinação de diversos sistemas de aproveitamento poderá ser benéfica.

2.5 Gestão energética

A colocação de geradores em equipamentos de pequenas dimensões não é muito lógica já que a potência gerada é mínima. Em sistemas de maiores dimensões onde pode ser instalada uma maior quantidade de módulos, e estes estão sujeitos a um diferencial térmico mais acentuado, é que se consegue alcançar potências consideráveis.

A gestão e armazenamento de energia elétrica é um ponto chave nestes geradores. A ligação destes módulos à rede pode ser feita de modo semelhante ao método utilizado para os painéis solares fotovoltaicos. Portanto, como pode ser visto na figura 2.12, o GTE é uma fonte DC e necessita de um inversor para a conversão para AC e um transformador para que a sua tensão seja igualada à da rede.

Como já referido, para instalações de pequenas dimensões a inclusão deste sistema não apresenta vantagens devido às baixas tensões e correntes geradas. Isto faz com que a melhor opção para a gestão elétrica sejam as baterias.

Outro aspecto crítico a considerar é o enunciado pelo Teorema da máxima transferência de potência. Este diz que a máxima transferência de potência ocorre quando a resistência da fonte se encontra em paridade com a resistência da carga.

A resistência interna de cada módulo depende da diferença de temperatura a que este está sujeito. Esta dependência já foi testada e não é linear. Foi estipulado que a resistência interna de um módulo é composto por uma resistência média, que lhe é intrínseca, juntamente com uma resistência variável em série que, no fundo, serve como uma tolerância.[24]

Para garantir que seja aproveitada a potência máxima de um gerador, a resistência interna de cada módulo deve ser medida nas suas condições de funcionamento. Isto para que quando estes forem ligados entre si, a resistência equivalente do sistema seja igual à carga.

Neste trabalho é, então, realizado um estudo sobre módulos comerciais de baixa gama. Estes são colocados num sistema que tenta simular uma das possíveis condições de funcionamento de um gerador num permutador de calor entre 2 fluidos.

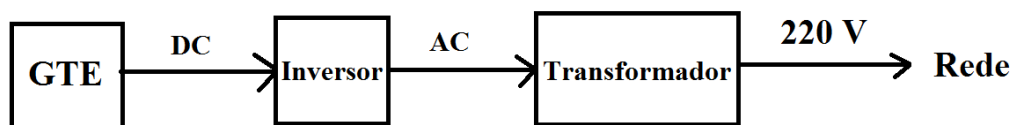


Figura 2.12: Esquema de ligação de um GTE à rede elétrica

De modo a tentar avaliar as potencialidades dos módulos estes são submetidos a baixas diferenças de temperatura já que o diferencial de temperatura é sempre entre a temperatura ambiente e uma fonte de calor.

Isto significa que o foco do estudo está na operação destes módulos a diferenças de temperatura reduzidas. Embora os módulos consigam suportar diferenciais térmicos elevados, os locais onde um elevado gradiente térmico possa ocorrer naturalmente são escassos.

Diferentes esquemas de montagem dos módulos serão feitos com o intuito de determinar o método mais rentável de aproveitamento. A montagem destes módulos poderá ser feita no interior do equipamento, aumentando bastante o grau de complexidade da instalação, ou pode ser simplesmente colocado no exterior do equipamento já existente.

Como um engenheiro e não puramente um cientista, é necessário ter em consideração a praticabilidade da instalação, a facilidade de manutenção e a lucratividade do processo. Com isto em mente, este trabalho inclui um capítulo que aborda a viabilidade económica destes geradores.

Para a realização da montagem experimental é necessária a captação de temperaturas, com este aspecto em mente é usado o Arduino como método de processar e guardar este parâmetro.

O Arduino é uma plataforma "*Open-Source*", de prototipagem eletrónica, criada em 2005 por dois italianos que tinham como visão possibilitar o desenvolvimento, a baixo custo, de sistemas eletrónicos de controlo ou captação de dados.

Juntamente com o hardware de baixo custo, fácil compreensão e compatibilidade com os mais diversos sistemas eletrónicos, temos um software com uma consola e linguagem simples, baseado em Java. As portas das placas encontram-se rotuladas de modo a facilitar as montagens. Estas características tornam o Arduino uma escolha preferencial, mesmo para utilizadores com pouca experiência em eletrónica e programação.

Por fim, este trabalho tenta seguir, o mais fielmente possível, o método científico. São realizadas experiências chave com o intuito de monitorizar certos aspectos e parâmetros do uso destes geradores a baixas temperaturas, para que a aplicação quotidiana, dos mesmos, na geração elétrica esteja um passo mais próximo da realidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Em luz do método científico, para que uns determinados resultados sejam válidos, o método de obtenção dos mesmos terá de ser replicado até ao ínfimo detalhe. Portanto, nesta secção serão apresentados todos os materiais usados com intuito de tornar esta experiência replicável.

A lista de materiais encontra-se no anexo [II](#).

3.1.1 Módulo Peltier SP1848

Os módulos foram adquiridos através de uma grande empresa e as especificações fornecidas e foto do mesmo estão apresentadas na figura [3.2](#) e [3.1](#)



Figura 3.1: Módulo termoelétrico

Esta tabela permite traçar 2 gráficos, apresentados na figura [3.3](#), para uma melhor visualização da informação.

SP1848 thermoelectric power generation chart

Temperature (°C)	20	40	60	80	100
Open circuit voltage (V)	0.97	1.8	2.4	3.6	4.8
Short-circuit current (A)	0.225	0.368	0.469	0.558	0.669

Figura 3.2: Especificações do Módulo Peltier SP1848[25]

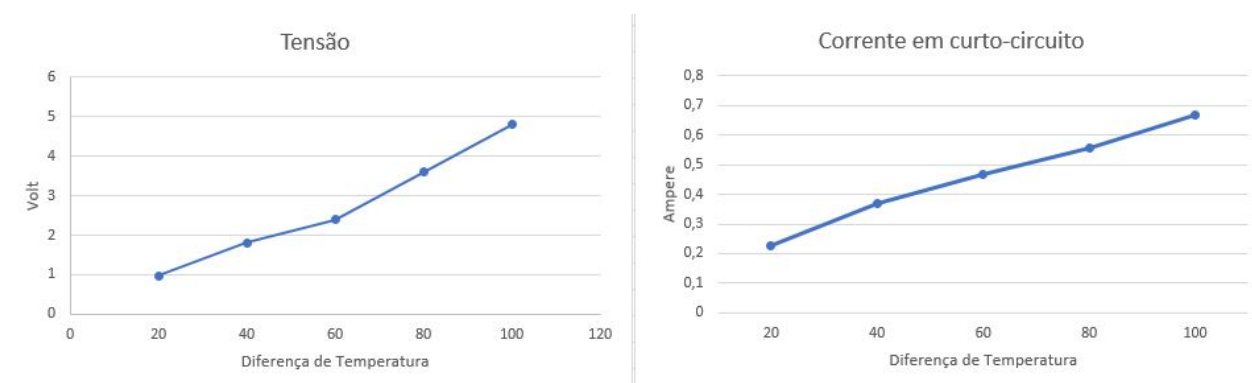


Figura 3.3: Tensão e Corrente de 1 módulo em função da diferença de temperatura

3.2 Método Experimental

Tanto a preparação como a metodologia da experiência têm que ser respeitadas para que uma replicação bem sucedida possa acontecer. Numa primeira instância apresentar-se-á detalhadamente os passos feitos de preparação para as experiências e de seguida as condições de funcionamento da mesma.

3.2.1 Preparação

O corte de um quadrado com lado de 11 cm, no centro do cartão, e de 2 quadrados com 11 cm e 13 cm de lado da chapa de alumínio é o primeiro passo a tomar. De modo a evitar que o interior do cartão se deteriore, os rebordos deste corte central foram cobertos com fita cola de alumínio.

A fixação do quadrado de maiores dimensões foi feita com a colocação de silicone de altas temperaturas na sua periferia e com a adição de Fita cola de Alumínio posteriormente. Independentemente das experiências os módulos Peltier são colocados termicamente em paralelo sendo barrada uma camada generosa de massa dissipadora antes de estes serem colocados sobre a chapa de alumínio. Os cabos dos módulos atravessam o interior do cartão e saem de um orifício na periferia do cartão para facilitar a sua ligação com o sistema de aquisição de dados.

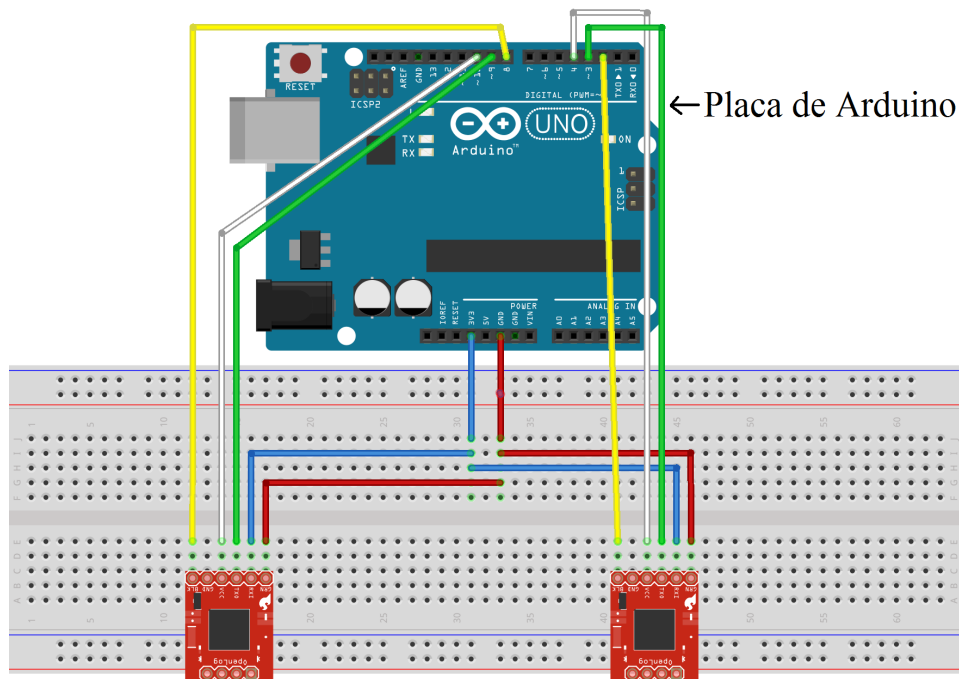


Figura 3.4: Esquema das ligações Arduino-Termopares

Os esquemas de ligação dos módulos para cada experiência encontram-se descritos em 3.3.

Os módulos foram fixados colocando silicone na sua periferia e posteriormente foi colocada uma camada de massa dissipadora no seu topo. Os dissipadores foram fixados ao quadrado de alumínio 11x11cm de igual modo aos módulos, ou seja, com uma camada uniforme de massa dissipadora e silicone na sua periferia.

No final, foi colocado o conjunto dos dissipadores-chapa sobre os módulos, um esquema e foto geral de montagem pode ser observados nas figura 4.4 e 3.5, respectivamente. Foi também necessário realizar um furo de 0,5cm a 2,5cm de distância do buraco já existente no cartão para que seja possível a passagem do termopar para a medição da temperatura no interior da panela.

O sistema de aquisição das temperaturas foi montado usando o Arduino Uno e a montagem do mesmo deverá estar em conformidade com a figura 3.4. Este sistema registra também a data e hora de cada medição.

Os termopares foram ligados aos conversores e estes, por sua vez, serão ligados às 3 respectivas portas, o Ground, o VCC e 3.3V. Estas portas foram definidas através do software do Arduino. O código utilizado encontra-se no anexo I.

De notar que o ritmo de aquisição de dados definido foi de 2 em 2 segundos e o Arduino foi alimentado através da sua ligação ao computador. A gravação de dados foi feita diretamente para o Excel através de um software chamado de PLX-DAQ.

Com o intuito de evitar uma grande pluma térmica, a panela foi revestida com lã de rocha e sobre a placa de aquecimento elétrica foi colocada a placa de cortiça com um

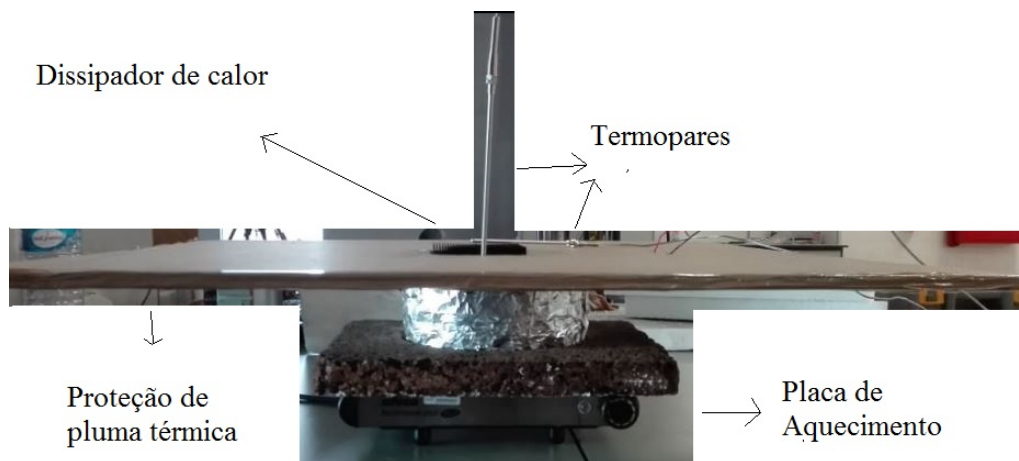


Figura 3.5: Montagem experimental

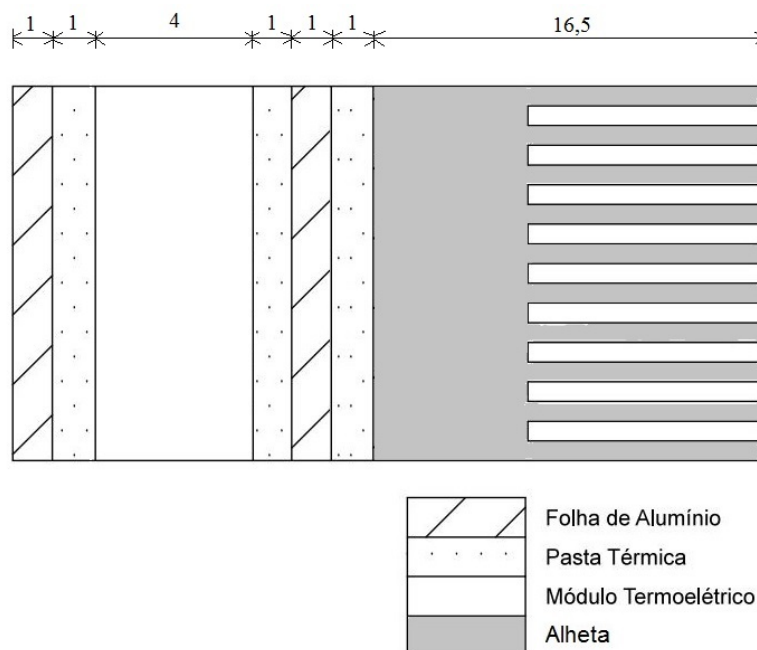


Figura 3.6: Esquema de montagem experimental 1 com dimensões em *mm*

orifício circular na zona de aquecimento da placa, como pode ser visto na figura 3.7 e 3.5.

Os fios que saem na extremidade do cartão são ligados ao sistema apresentado na figura 3.8. Este é o sistema de aquisição de tensões e correntes e o valor da resistência usada é de 99Ω .



Figura 3.7: Revestimento isolante da panela e fogão

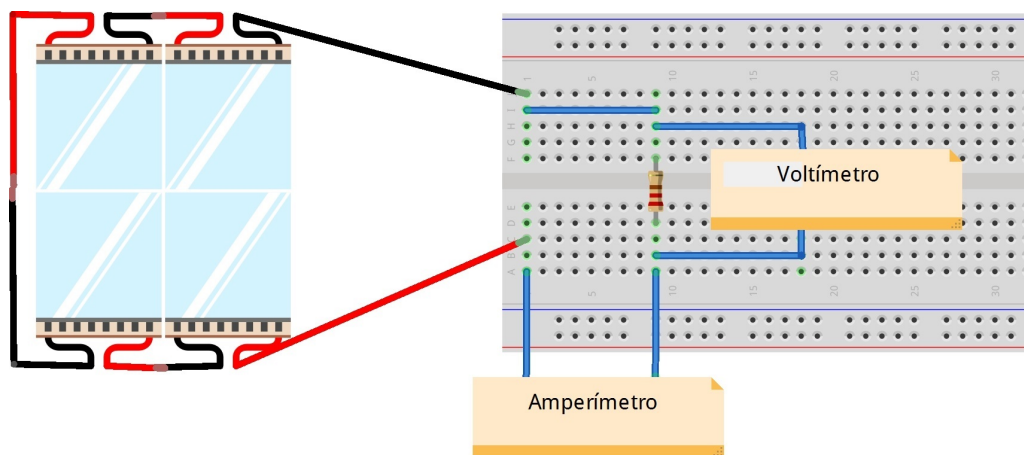


Figura 3.8: Esquema das ligações dos Multímetros

3.2.2 Condições Iniciais

É colocada uma quantidade reduzida de água na panela para que esta chegue à ebulição rapidamente, a quantidade tem de ser suficiente para que a água não evapore completamente antes do sistema atingir o equilíbrio térmico. Foi utilizado aproximadamente 0,3L.

A panela é colocada sobre a placa de aquecimento. O cartão é colocado sobre a panela, centrando-o com a mesma. Todos os elementos da montagem encontram-se à temperatura ambiente no início da experiência.

Um dos termopares foi colocado no respetivo orifício a aproximadamente 4 cm de profundidade, ficando assim a 1cm na vertical da chapa metálica. O outro termopar foi colocado sobre as alhetas, centrado e a 1 cm de altura das mesmas, como pode ser observado na figura 3.9.

Após todos os elementos estarem ajustados, são iniciados os sistemas de aquisição de dados (Arduino, Excel e Multímetros).

Graças à ausência de um multímetro digital de baixo custo e como, após inúmeras

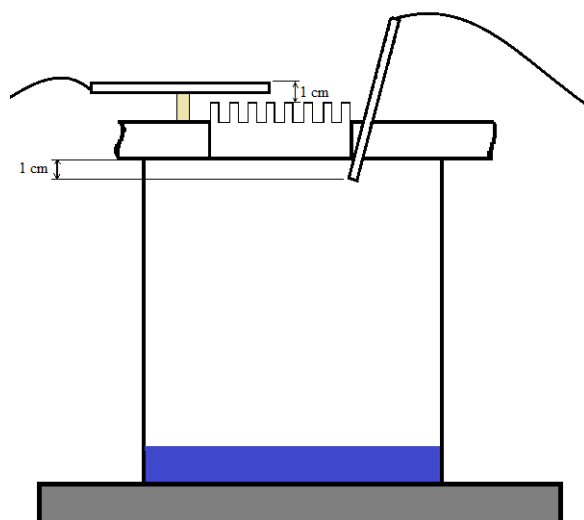


Figura 3.9: Esquema das condições iniciais da montagem experimental sem ventoinha

tentativas, a montagem de um amperímetro e voltímetro através do Arduino foi mal sucedida, o método de gravação da tensão e corrente foi manual. Foi realizado um vídeo dos 2 multímetros da figura 3.8 com um relógio ao lado dos mesmos para que possa ser feita a sincronização posterior dos valores com as temperaturas registradas em excel.

Assim que foi iniciada a gravação dos multímetros foi ligada a placa de aquecimento, dando então início à experiência.

Aquando a colocação da ventoinha sobre as alhetas exterior o termopar foi colocado lateralmente a 1 cm das alheta e 1cm na vertical do cartão, como pode ser visto na figura 3.10

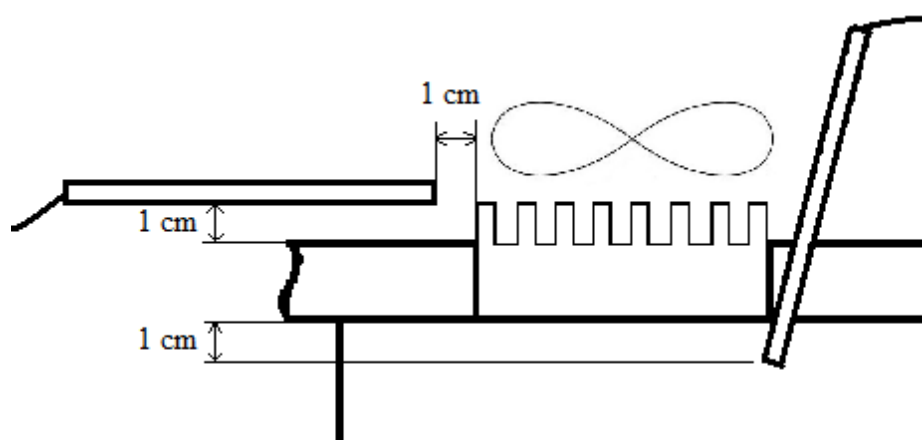


Figura 3.10: Esquema das condições iniciais da montagem experimental com ventoinha

3.2.3 Verificação

Dado que nesta experiência tem como objetivo obter a maior diferença de temperaturas possível entre 2 pontos alinhados verticalmente e sendo que a temperatura mais elevada é imposta na parte inferior teve de se ter uma especial atenção à pluma térmica criada pelo fogão elétrico.

Como já foi referido, tanto a placa de aquecimento como a panela foram revestidos com isolantes para minimizar a sua libertação de calor, mas o vapor proveniente do interior da panela também adulteraria os resultados caso fosse ignorado.

O conjunto dos módulos com os dissipadores foi encaixado no centro do cartão para que a pluma térmica fosse completamente desviada e não tivesse influência nenhuma na temperatura imposta nos dissipadores colocados na parte superior.

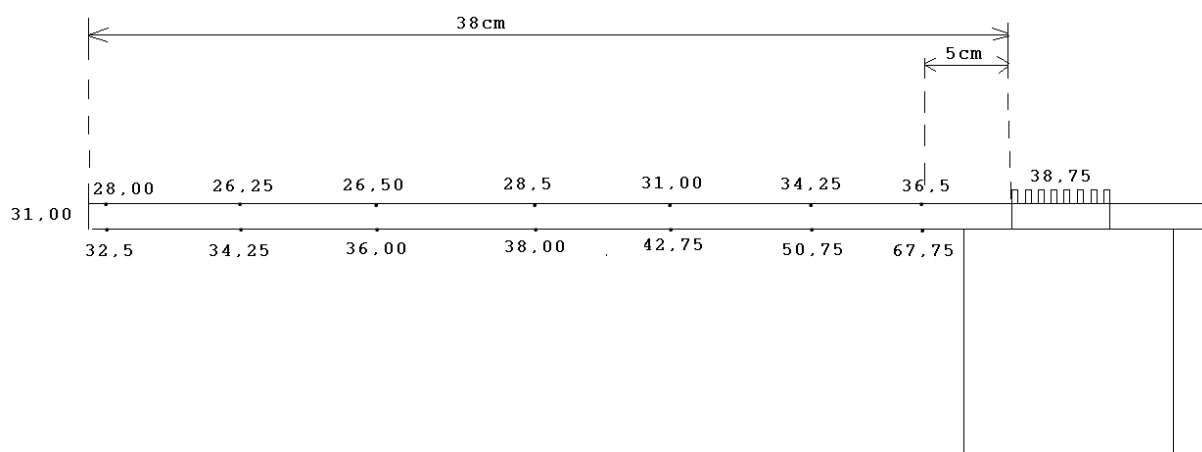


Figura 3.11: Distribuição da temperatura, em graus Celsius, ao longo do Cartão

O cartão inicialmente escolhido tinha aproximadamente 85x85cm e foi realizado um ensaio onde foi medida a distribuição de temperaturas ao longo da parte inferior e superior do mesmo. Como pode ser visto na figura 3.11, estas dimensões de cartão permitem um desvio bem sucedido da pluma térmica e pode-se considerar que o aumento de temperatura derivado da pluma é desprezável.

O que se pode também concluir é que, na parte superior do cartão, existe uma distribuição de temperatura descendente do centro para as extremidades. Isto reforça a ideia que a pluma térmica inferior não tem influência. Portanto, não foi necessária a aquisição de um cartão de maiores dimensões.

A aquisição dos valores para este teste foi feita com o mesmo sistema de medição de temperaturas usado na experiência em si. A água foi aquecida até entrar em ebulição e antes de se começar a medir foi dado algum tempo para que o sistema estivesse em equilíbrio. O termopar em cada uma das medições foi colocado a 1 cm de distância do cartão. O espaçamento entre medições foi de 5cm.

3.3 Experiências

3.3.1 Experiências com medição do regime transitório

Inicialmente foram efetuadas 4 experiências com o intuito de estudar o comportamento destes módulos até atingirem o regime estacionário. Nestes 4 casos foram colocados na montagem 4 módulos eletricamente em série.

O registo dos dados é feito desde que as condições iniciais, anteriormente referidas, são estabelecidas e é terminado assim que deixem de existir mudanças significativas nos valores de temperatura e tensão.

3.3.1.1 Experiência 1

A experiência 1 foi feita em conformidade com o esquema da figura 4.4.

Só se encontram dissipadores de calor na parte superior da montagem, em contacto com o ar ambiente, fora da panela.

3.3.1.2 Experiência 2

A experiência 2 foi feita em conformidade com o esquema da figura 3.12.

De maneira semelhante, só se encontram dissipadores na parte superior da montagem e a ventoinha é ligada ao transformador de 12V e apoiada diretamente sobre as alhetas.

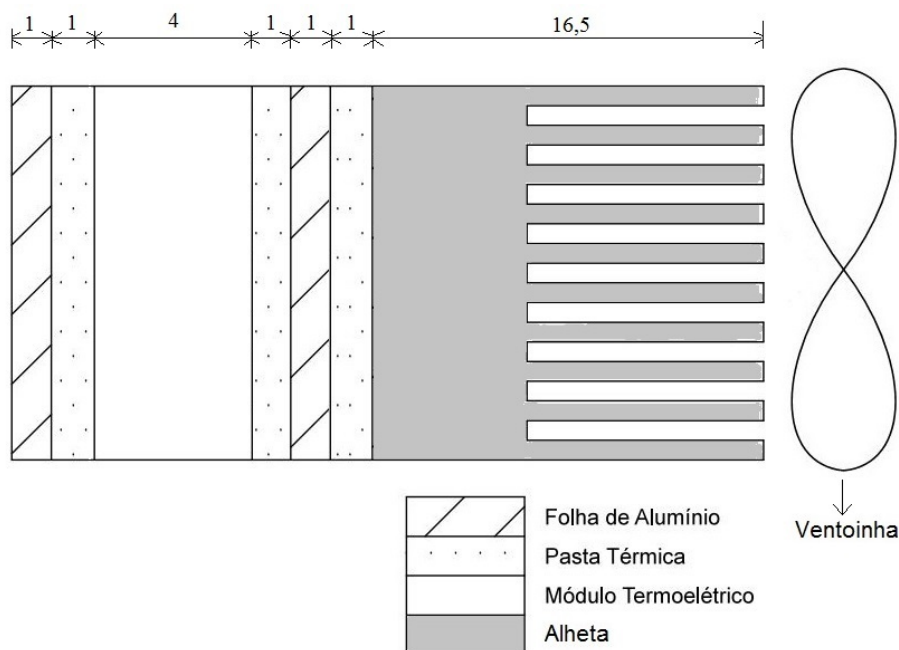


Figura 3.12: Esquema de montagem experimental 2

3.3.1.3 Experiência 3

A experiência 3 foi feita também em conformidade com o esquema da figura 3.12.

Dado que a ventoinha não está ligada ao transformador mas sim aos modos, as diferenças no esquema do circuito elétrico da experiência estão apresentadas na figura 3.13.

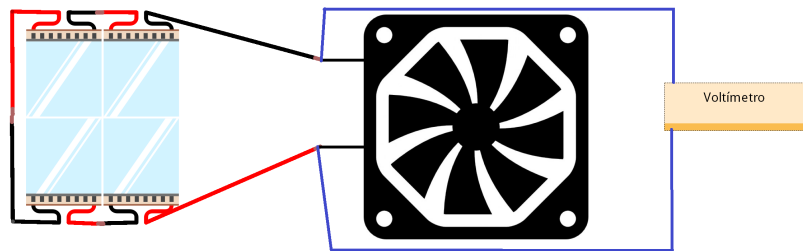


Figura 3.13: Esquema das ligações da ventoinha e voltímetro na montagem com retroalimentação

3.3.2 Experiências com Reóstato

As seguintes experiências foram realizadas com o intuito de medir as resistências internas e eficiências do gerador termoeletrico. O registro dos valores, contrariamente às experiências anteriores, é apenas feito assim que o sistema atinge o regime estacionário.

No sistema de aquisição da tensão e corrente foi utilizado um reóstato com uma amplitude de 0-33 Ω em vez da resistência de 99 Ω .

São feitas medições da tensão e corrente para 33 valores diferentes de resistência, ou seja, entre medições existe a diferença esperada de 1 Ω .

Para cada experiência são realizados 3 varrimentos pelo reóstato com o intuito de se calcular a potência máxima, resistência interna e o erro experimental da montagem.

Devido às baixas tensões geradas foi impossível realizar varrimentos pelo reóstato, nas condições da experiência 3, já que a ventoinha não será alimentada com tensão suficiente para o seu funcionamento. As experiências a ser realizadas podem ser observadas na tabela ??.

Entre as experiências os módulos permaneceram na mesma posição para que a transmissão de calor seja semelhante. Na experiência de apenas um módulo, os 3 restantes encontravam-se na mesma posição, mas sem se encontrarem ligados eletricamente.

Para as experiências com reóstato não foram realizadas experiências nas condições da experiência 3. Ou seja, não foram realizadas experiências com a ventoinha de computador retro-alimentada.

RESULTADOS

4.1 Experiências do regime transitório

De seguida são apresentados os gráficos das primeiras 3 experiências, onde foram feitas medições até se atingir o regime estacionário.

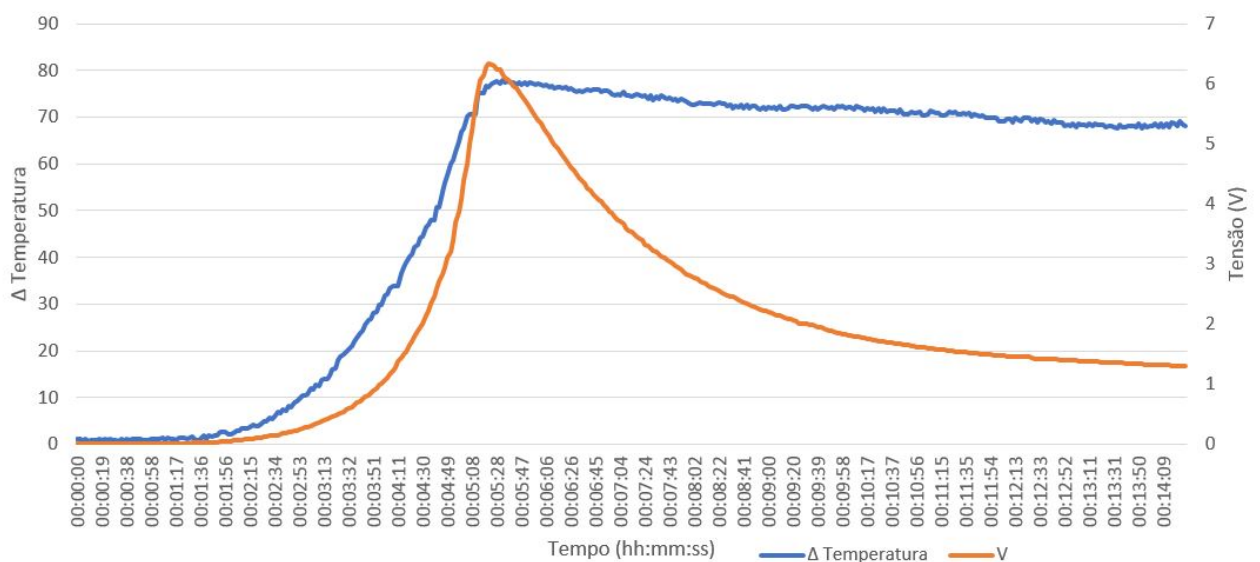


Figura 4.1: Diferença de temperatura do ar e tensão em função do tempo na experiência 1

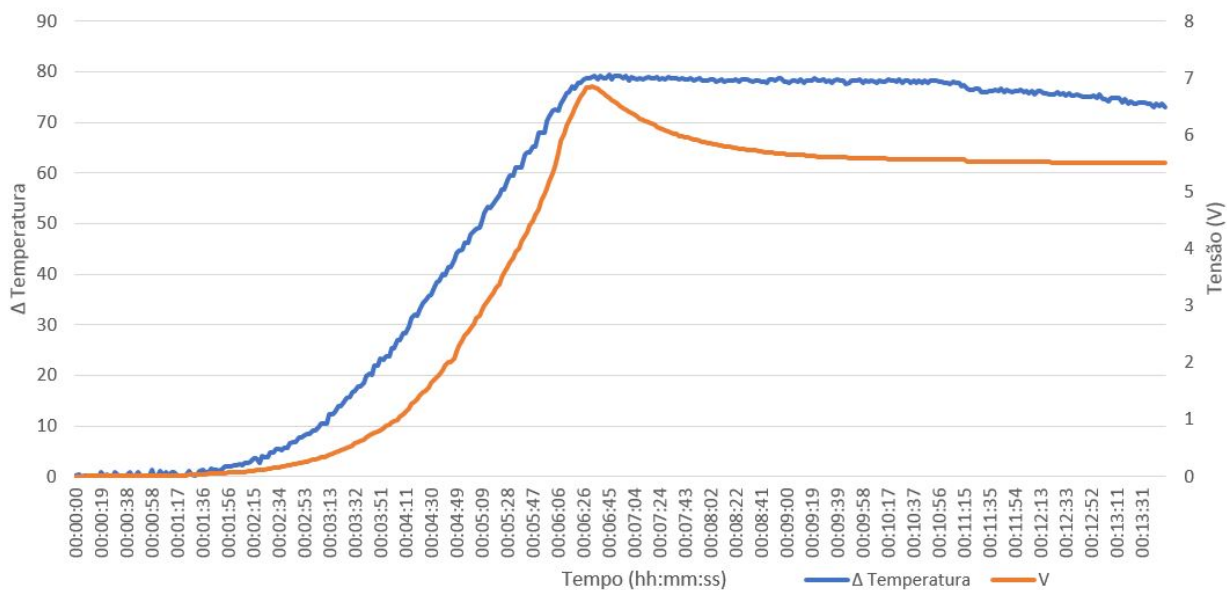


Figura 4.2: Diferença de temperatura do ar e tensão em função do tempo na experiência 2

Na figura 4.3 é colocada uma linha vermelha vertical a simbolizar o instante em que a ventoinha iniciou o seu movimento.

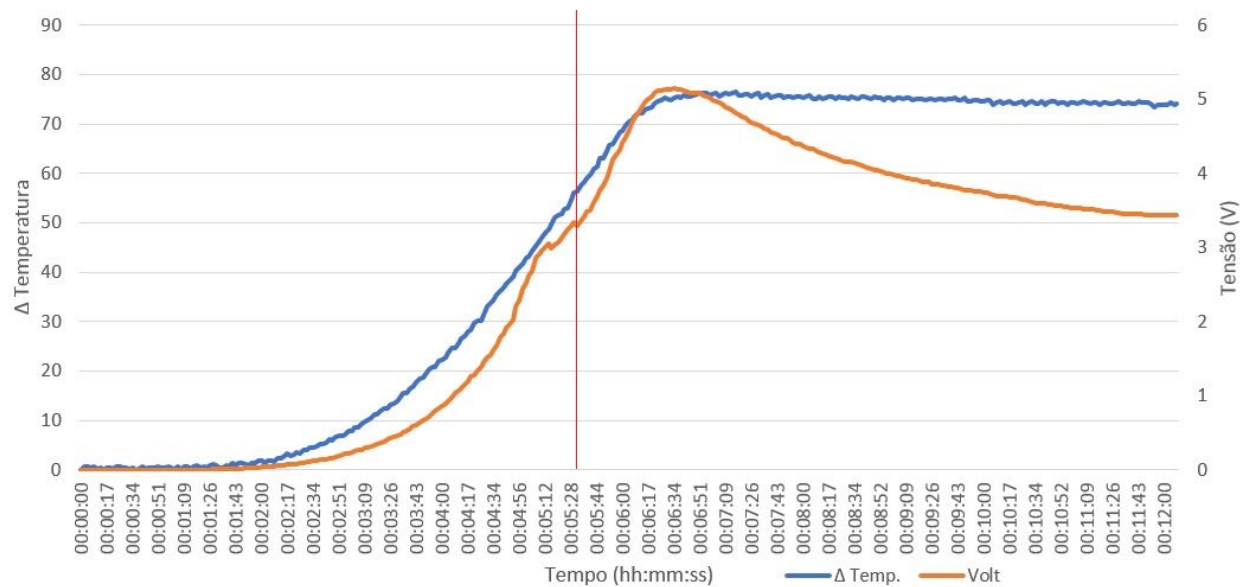


Figura 4.3: Diferença de temperatura do ar e tensão em função do tempo na experiência 3

4.2 Resistência térmica equivalente

4.2.1 Experiência 1

Com o intuito de calcular a diferença de temperatura nas superfícies do módulo, em **regime estacionário**, é necessário calcular uma resistência equivalente da montagem.

A resistência equivalente da primeira pode ser calculada através da soma das resistências já que estas se encontram todas em série, como pode ser visto na figura 4.5, esta figura é uma representação simbólica da figura 4.4.

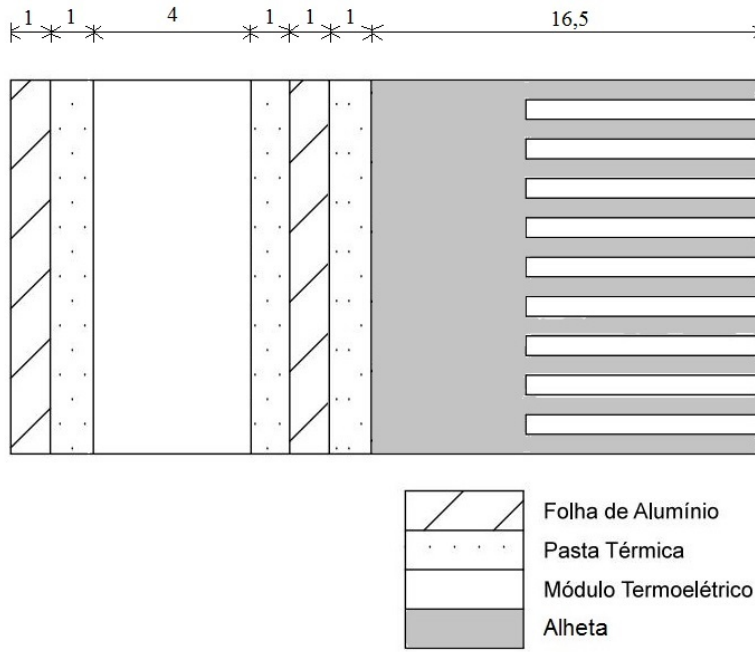


Figura 4.4: Esquema de montagem experimental 1 com dimensões em *mm*

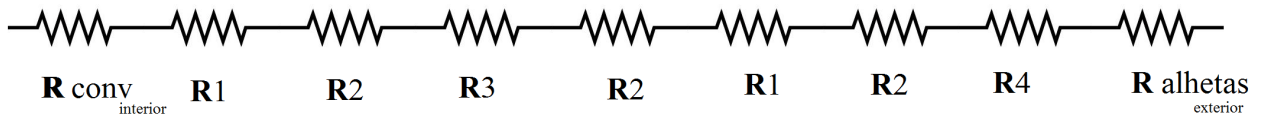


Figura 4.5: Esquema das resistências da experiência 1

As resistências R1 e R2 encontram-se repetidas pois possuem as mesmas características, ajudando à simplificação dos cálculos:

$$R_{total} = R_{interior} + 2 \cdot R_1 + 3 \cdot R_2 + R_3 + R_4 + R_{alhetas}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_{vapor} \cdot A_t} + 2 \cdot \frac{e_1}{K_1 \cdot A_1} + 3 \cdot \frac{e_2}{K_2 \cdot A_2} + \frac{e_3}{K_3 \cdot A_3} + \frac{e_4}{K_4 \cdot A_4} + \frac{1}{h_{ar} \cdot (\eta_{alheta} \cdot A_{alheta} + A_{entrealhetas})}$$

Os dados usados para o cálculo são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tabela de valores usados para o cálculo da resistência equivalente

	Vapor R_{int}	Chapa Al. R_1	Pasta Térmica R_2	Módulo R_3	Alheta R_4
$K (W/m.C)$		205	2	1.5	205
$e (m)$		0.001	0.001	0.004	0.005
$A (m^2)$	0.01136	0.01136	0.0064	0.0064	0.01136
$h (W/m^2.C)$	6000				

Os dissipadores colocados na montagem têm no total 1024 alhetas com um perímetro de 0.0048m, comprimento de 0.0115 e área frontal de $1.4 \cdot 10^{-6} m^2$.

É necessário fazer uma estimativa do coeficiente de convecção para esta experiência, como pode ser visto na figura 4.6, o coeficiente de convecção de um *heat sink* (dissipador de calor) de pequenas dimensões estará entre 3 e 6.

Case	Electronics Environment	Heat transfer model	Thermal solution over component	Approximate Heat Transfer Coefficient (in W/m^2K)	Approximate thermal resistance ($^{\circ}C/W$)
A	Handheld device with up to 2 mm air gap, operates when horizontal	Conduction through air (worst case)	None	Treat as conduction in gap	50 – 100
B	Small module, no fan, orientation controlled (always vertical). Open top & bottom, chimney style convection	Natural convection h also depends on ΔT & height	Optimized plate fin heat sink (vertical base & fins)	For plate fin heat sinks, correlations are readily available* 3 – 6 (based on H.S. area)	1 – 5
C	Laptop	Single small fan	Optimized heat sink	25 – 100 (based on H.S. area)	1 – 20
D	Desktop	Multiple fans	Optimized heat sink	50 – 150 (based on H.S. area)	0.25 – 5

* White, Frank M., Heat and Mass Transfer, Adison-Wesley © 1991, p. 408-9.

Figura 4.6: Tabela de estimativas de coeficientes de convecção. [26]

Um outro estudo para estimar o coeficiente de convecção de um dissipador de calor, em alumínio, de pequenas dimensões já foi efetuado. Este valor foi alcançado através de um processo iterativo e o valor foi de $h = 4,8 W/m^2.C$. [27]

Tendo estes aspetos em conta para este trabalho é assumido que, para as condições da experiência 1 o $h_{exterior} = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$.

Com esta estimativa, a eficiência da alheta pode ser obtida através da figura 2.8. O valor de eficiência é de aproximadamente 0,8.

A área de alhetas e entre alhetas, necessárias para o cálculo da última resistência, são respetivamente $0,056525 \text{ m}^2$ e $0,00993 \text{ m}^2$.

Após o cálculo da resistência equivalente podemos obter o fluxo de calor utilizando a diferença de temperaturas entre o ar interior e exterior quando o sistema atinge o equilíbrio térmico.

$$q = \frac{\Delta T}{R_{eq}} = \frac{69,5}{4,217} = 16,24 \text{ W}$$

Como pode ser visto na figura 4.7, as temperaturas A e B (superfícies do módulo) podem ser calculadas usando as resistências parciais que se encontram assinaladas pelas setas vermelhas.

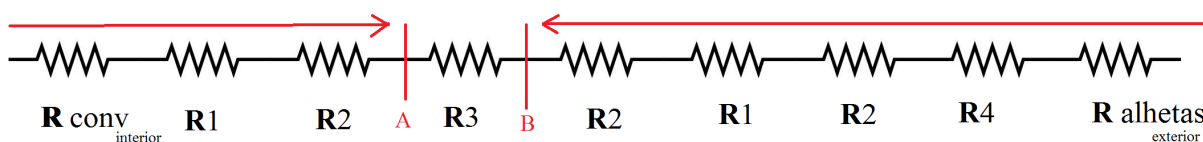


Figura 4.7: Esquema das resistências da experiência 1

$$T_A = T_{int} - q \cdot R_a = 102,5 - 16,48 \cdot 0,09322 = 100,964 \text{ C}$$

$$T_B = q \cdot R_b + T_{ext} = 16,48 \cdot 3,7072 + 33 = 95,097 \text{ C}$$

Portanto obtemos uma diferença de temperaturas no módulo de $6,867 \text{ C}$.

O processo de cálculo para as seguintes experiências foi o mesmo, a grande diferença está na adição da ventoinha que altera o coeficiente de convecção. De seguida são estimados novos valores de h .

4.2.2 Experiência 2

O fornecedor da ventoinha afirma que quando esta funciona com uma tensão de 12 V tem um caudal de $40,5 \text{ ft}^3/\text{min}$. Portanto,

$$40,5 \text{ ft}^3/\text{min} = 0,01913 \text{ m}^3/\text{s}$$

A área da ventoinha está representada a azul na figura 4.8 e pode ser calculada da seguinte maneira,

$$A = 0,06^2 \times \pi - 0,02^2 \times \pi - 0,03 \times 0,005 \times 4 = 0,0078823 \text{ m}^2$$

No entanto, como a ventoinha se encontra diretamente por cima das alhetas, a área útil é ligeiramente menor já que o ar terá de escoar para entre as alhetas. O rácio entre a área entre as alhetas e a total é,

$$\frac{A_{\text{entre alhetas}}}{A_{\text{total}}} = \frac{0,00993}{0,01136356} = 0,874$$

a área útil será,

$$Area_{\text{util}} = 0,0078823 \times 0,874 = 0,0068889 \text{ m}^2$$

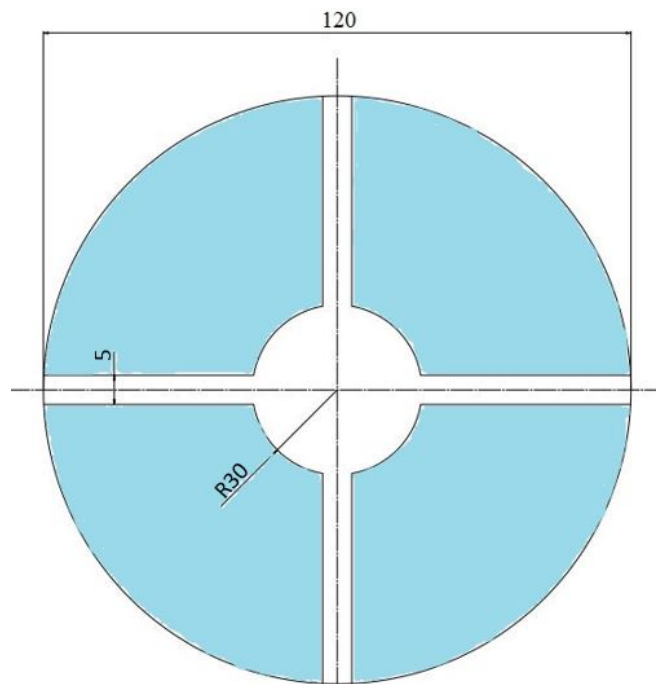


Figura 4.8: Esquema da área útil de uma ventoinha com dimensões em *mm*

e a velocidade,

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,01913}{0,0068889} \approx 2,777 \text{ m/s}$$

Com a velocidade é possível fazer uma estimativa ao h , para realizar o tratamento de dados na experiência 2, através da seguinte expressão:

$$h = 8,72 \times V^{0,8} = 8,72 \times 2,777^{0,8} = 19,74 \text{ W/m}^2.C$$

Esta estimativa inicial parece um pouco reduzida, segundo os valores apresentados na figura 4.6. Portanto, será utilizado o menor valor do intervalo, ou seja, o valor de h utilizado para os cálculos na experiência 2 será de $25 \text{ W/m}^2.C$.

Estes valores de h permitem calcular as diferentes eficiências de alheta e resistências térmicas equivalentes a serem utilizadas no cálculo das respetivas experiências.

4.2. RESISTÊNCIA TÉRMICA EQUIVALENTE

Na tabela 4.2 são apresentados para cada experiência os valores das resistências internas, temperaturas nos termopares e diferença de temperatura nas superfícies do módulo.

Tabela 4.2: Tabela de temperaturas, Resistências equivalente para as diferentes experiências realizadas.

	ΔT_{ar}	$q(W)$	$R_{equivalente}(C/W)$	ΔT módulo
Experiência 1	68,5	16,24	4,217	6,87
Experiência 2	74	51,11	1,448	21,29

4.3 Experiências com Reóstato

De seguida são apresentados os valores da Potência em função da tensão para as experiências efetuadas com 1 e 4 módulos.

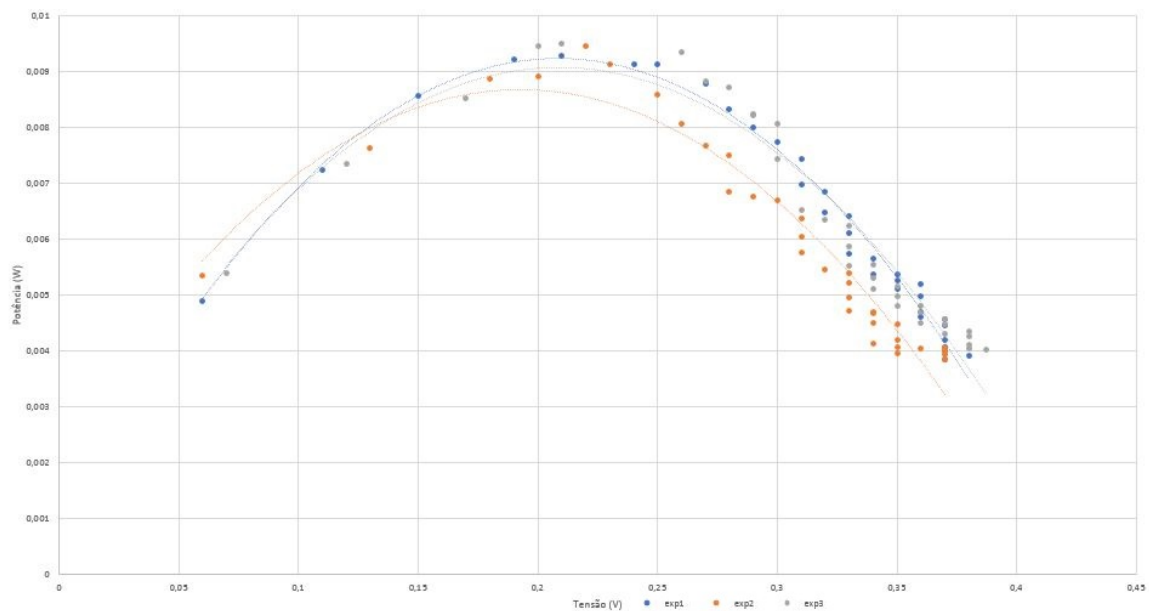


Figura 4.9: Potência, de um módulo, em função da tensão gerada com convecção natural

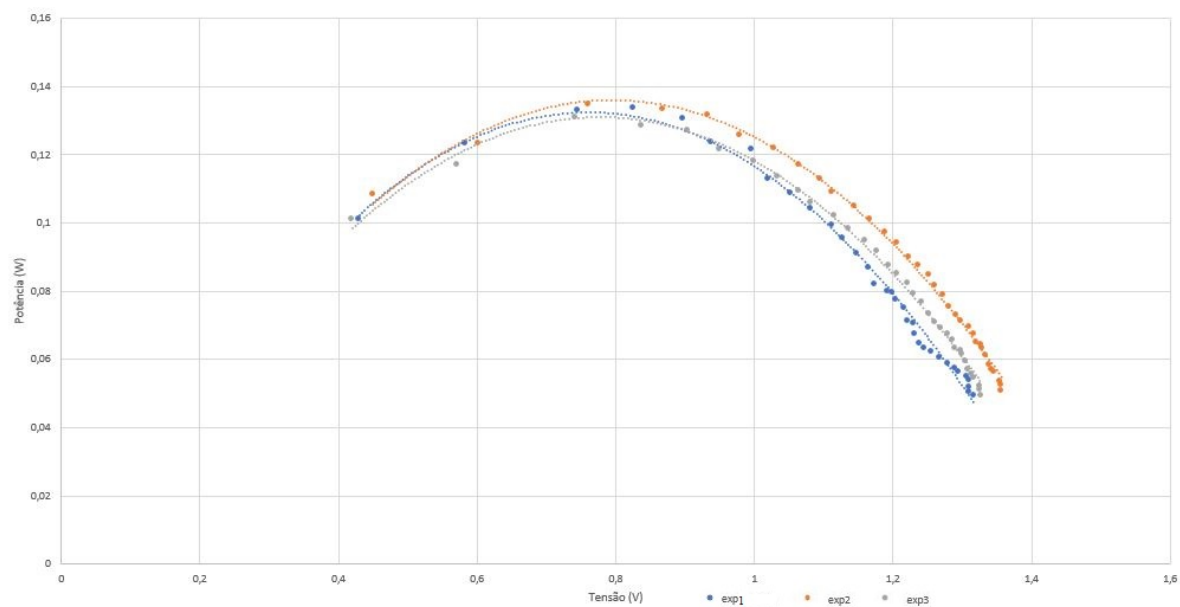


Figura 4.10: Potência, de um módulo, em função da tensão gerada com convecção forçada

4.3. EXPERIÊNCIAS COM REÓSTATO

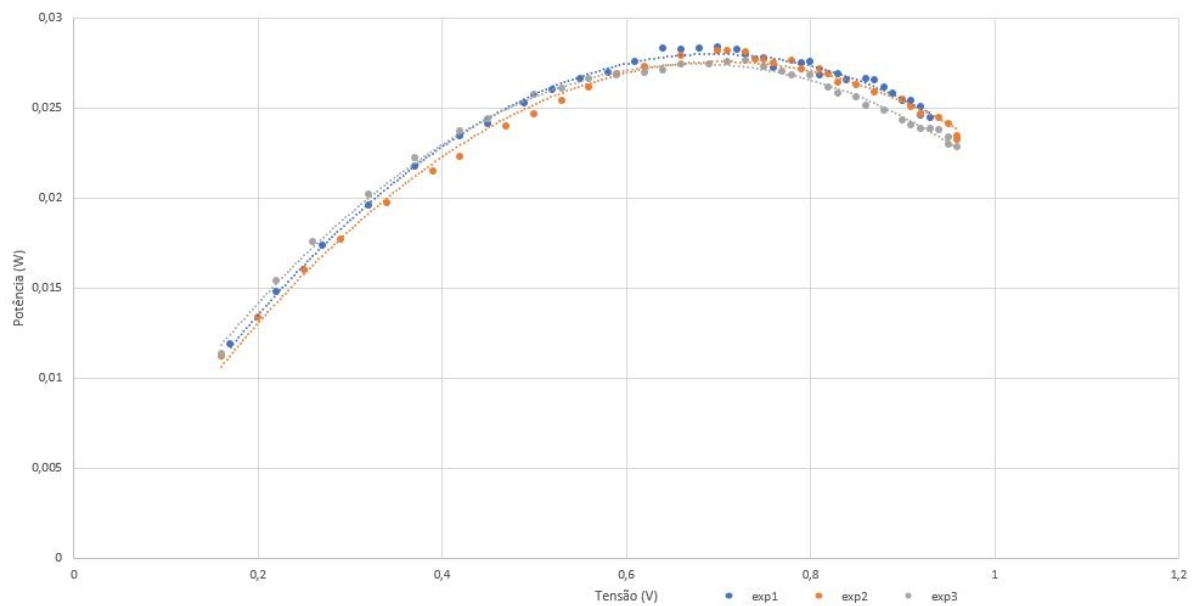


Figura 4.11: Potência, de 4 módulos em série, em função da tensão gerada com convecção natural

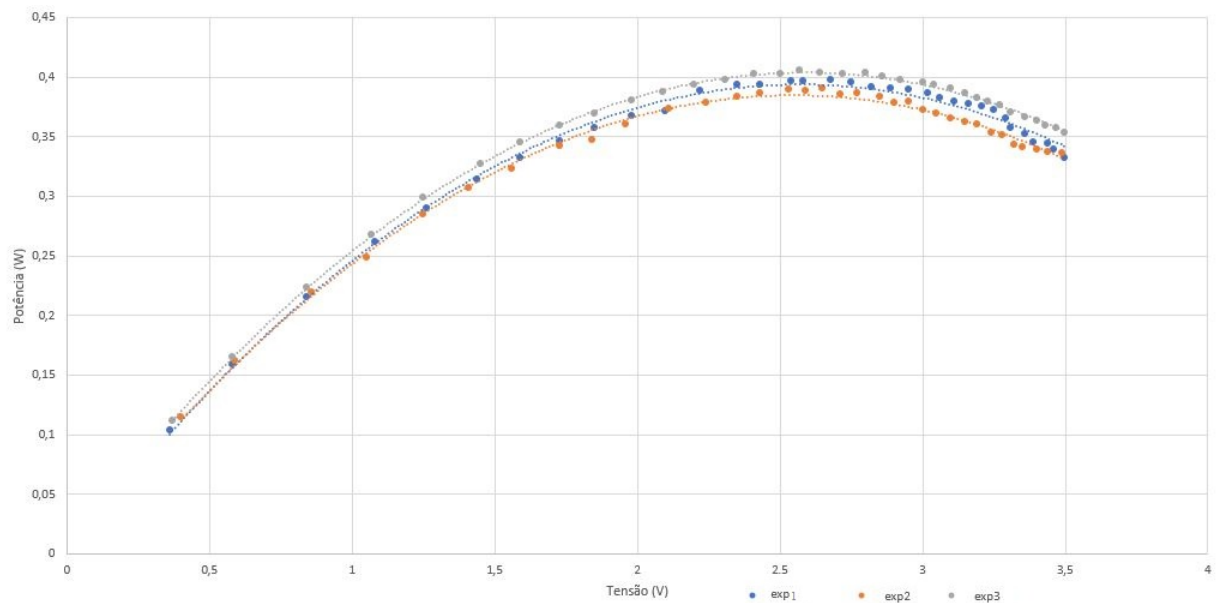


Figura 4.12: Potência, de 4 módulos em série, em função da tensão gerada com convecção forçada

Para cada varrimento das experiências anterior foi calculado o valor da resistência "real" através da Lei de Ohm, $V = IR$.

Foi efetuada uma média dos 3 varrimentos para o cálculo da Potência e Resistência "real". Os resultados são de seguida apresentados.

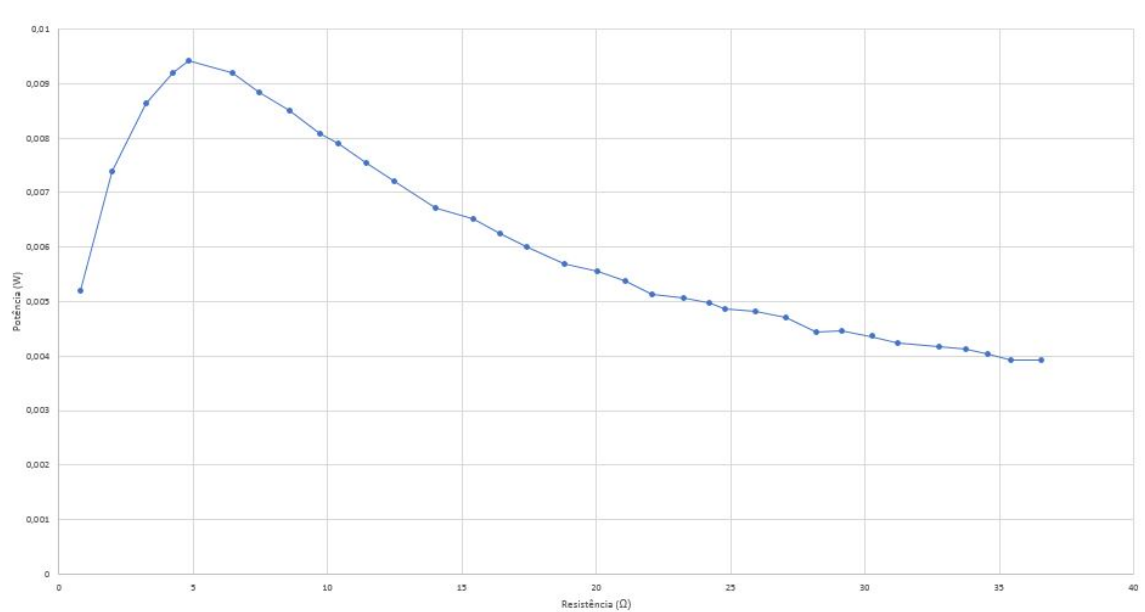


Figura 4.13: Potência, de 1 módulo, em função da Resistência na experiência com convecção natural

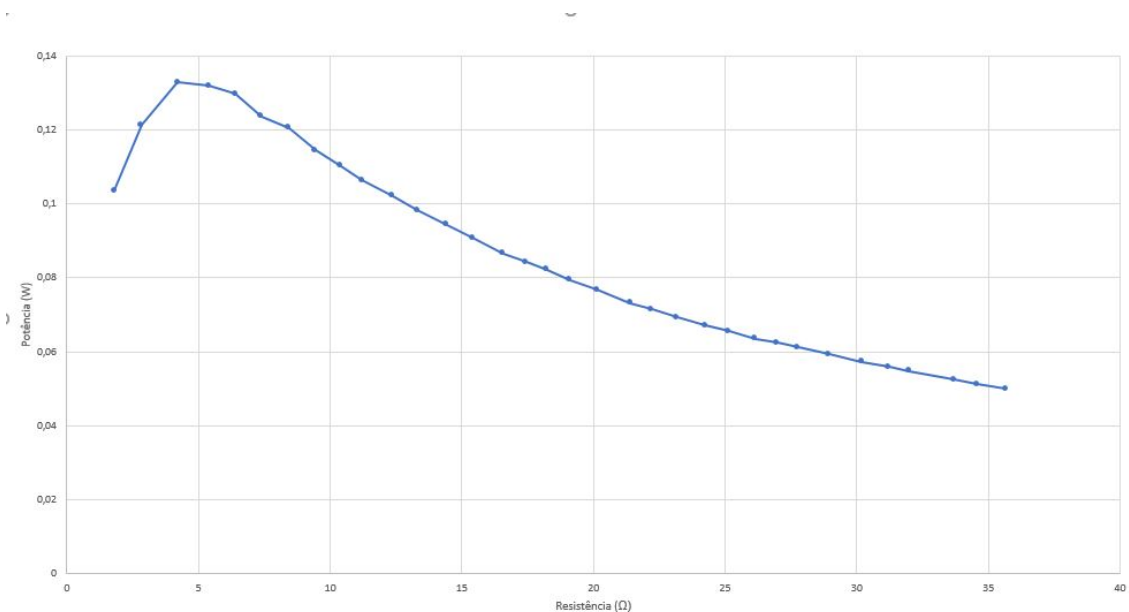


Figura 4.14: Potência, de 1 módulo, em função da Resistência na experiência com convecção forçada

O desvio padrão médio da potência, entre varrimentos, para o gráfico 4.15 foi de 0,000207 ou 3,51%

O desvio padrão médio da potência, entre varrimentos, para o gráfico 4.16 foi de 0,0018316 ou 2,17%

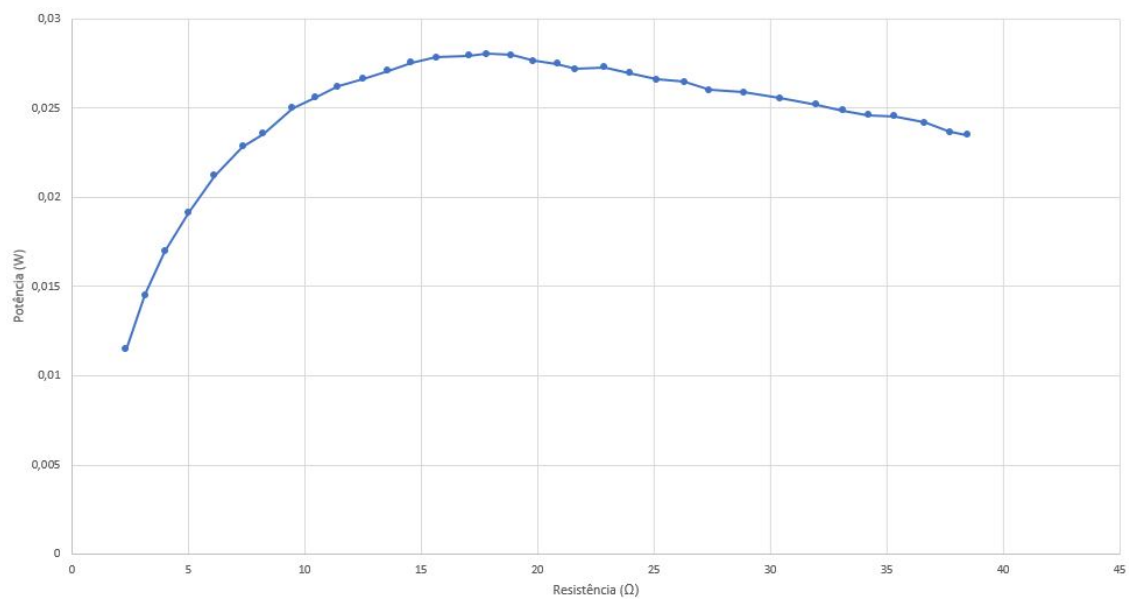


Figura 4.15: Potência, de 4 módulos em série, em função da Resistência na experiência com convecção natural

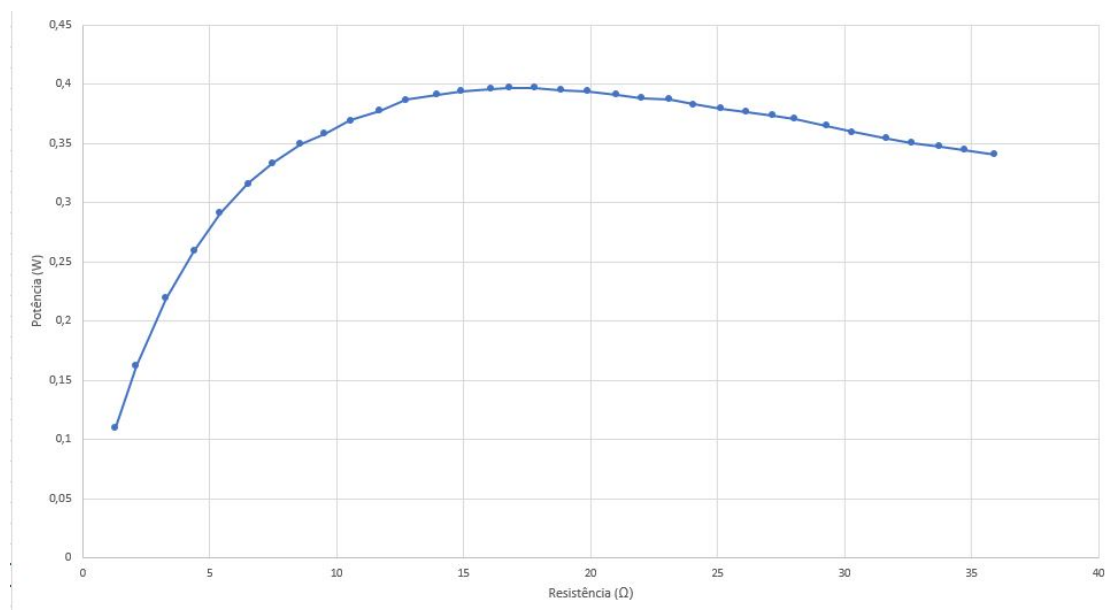


Figura 4.16: Potência, de 4 módulos em série, em função da Resistência na experiência com convecção forçada

O desvio padrão médio da potência, entre varrimentos, para o gráfico 4.15 foi de 0,000612 ou 2,62%.

O desvio padrão médio da potência, entre varrimentos, para o gráfico 4.16 foi de 0,00738 ou 2,17%

4.4 Eficiência

Utilizando o fluxo calor que atravessa os módulos, calculado no capítulo 4.2, e as potências médias máximas obtidas nas experiências com o reóstato é possível calcular uma eficiência máxima.

Na tabela 4.3 são apresentados os resultados.

Tabela 4.3: Potências Elétricas e Eficiências para cada experiência.

	Potência elétrica máxima (P)	Calor (q)	Eficiência máxima (%)
Experiência 1	0,0285	16,24	0,17
Experiência 2	0,397	51,11	0,77

É facilmente observado que a eficiência dos módulos aumenta quanto maior for o gradiente térmico. Isto já tinha sido observado na figura 2.11 e é de novo confirmado.

Estas estimativas de eficiências máximas estão em concordância com outros trabalhos semelhantes. [28]

As eficiências destes geradores para diferenças de temperatura reduzidas são extremamente baixas, mas entre não ter nenhum método de aproveitamento e utilizar estes módulos, será sempre melhor optar por um aproveitamento reduzido.

Graças à enorme incerteza associada ao cálculo do calor que atravessa o módulo, estes valores são muito pouco fiáveis. Uma nova experiência onde o erro de cálculo seja significativamente menor é que poderá gerar valores de eficiência de módulos que possam ser fiáveis.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 Experiências com Regime Transitório

Numa primeira instância podemos confirmar que os módulos *peltier* geram um potencial elétrico quando colocado um diferencial térmico sobre os mesmos e a ligação dos mesmo em série permitiu a soma das suas tensões o que vai de acordo com o princípio físico que rege estes módulos.

Em algumas das experiências, a aquisição de dados foi interrompida de uma maneira precoce. A aquisição de valores deveria ter continuado até ser claramente visível que a tensão, efetivamente, fazia uma linha horizontal em relação ao tempo. A repetição destas experiências também deveria ter sido feita para avaliar a precisão da montagem.

5.1.1 Experiência 1

Relativamente à experiência número 1, foi observado que antes do sistema atingir o equilíbrio térmico (regime transitório) a tensão atinge um pico de 6,33 V. Este pico ocorre quando a mistura de ar e vapor de água presente no interior da panela atinge a temperatura de 100° C, a partir deste ponto será impossível aumentar a temperatura sem algum tipo de pressão, no entanto a temperatura da mistura sobe até aos 102,75 ° C isto deve-se ao facto do cartão servir como tampa da panela e possibilitar este ligeiro aumento de pressão.

Após atingir o pico de tensão o sistema tende para o equilíbrio e a diferença de temperatura entre as superfícies do módulo foi cada vez menor, os resultados sugerem que o sistema montado, no equilíbrio, é capaz de gerar uma tensão de 1,32 V.

Este pico ocorre graças à elevada diferença de temperatura que ocorre no regime transitório, ou seja, na fase inicial da experiência. Como se pode observar na figura 5.1, o

pico de tensão ocorre quando a distribuição de temperaturas é semelhante ao instante t_5 , tendo esta o declive mais acentuado.

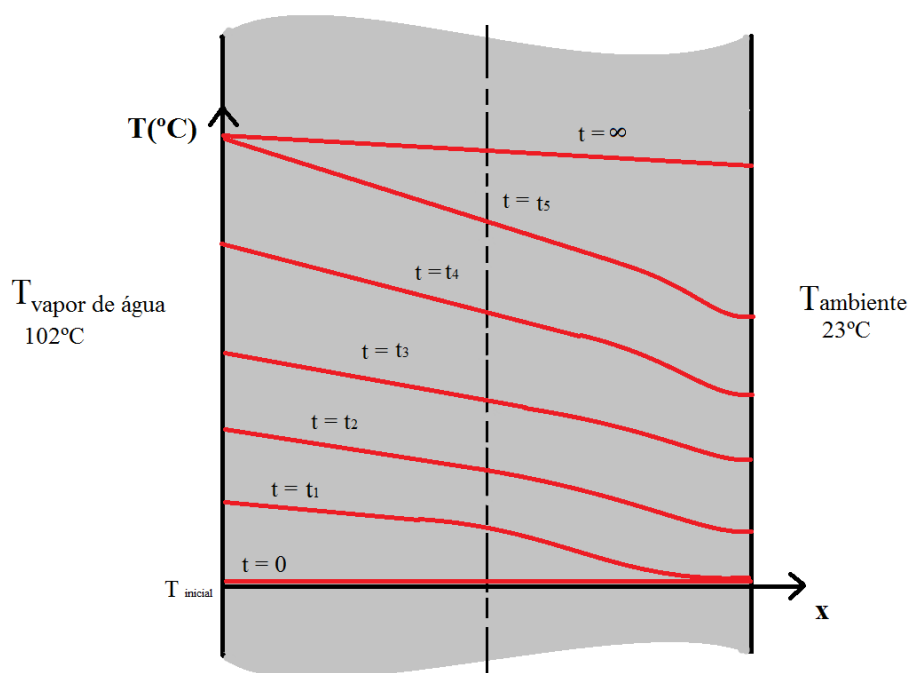


Figura 5.1: Diagrama da distribuição de temperaturas ao longo do módulo, em regime transitório.

Uma análise deste fenómeno de um pico de tensão e corrente sugere que um gerador que esteja projetado para gerar uma certa potência, numa determinada condição de funcionamento, terá de estar protegido eletronicamente no seu arranque de modo a evitar que o sistema a que este esteja ligado não seja sobrecarregado. A utilização de um disjuntor ou outro mecanismo de segurança será necessária.

Este resultado sugere que a utilização destes módulos, em sistemas onde apenas haja uma fonte de calor em contacto com a temperatura ambiente para a criação de uma diferença de temperaturas reduzida, é pouco eficaz. A baixa diferença de temperaturas impede os módulos de serem utilizados na sua total potencialidade, sendo assim necessária a ligação de uma quantidade muito elevada de módulos para que sejam alcançadas potências utilizáveis. Consequentemente a área de permuta de calor para a instalação dos módulos também será bastante extensa.

5.1.2 Experiência 2

Relativamente à experiência número 2, foi observado que antes do sistema atingir o equilíbrio térmico a tensão atinge um pico de 6,85 V. Este pico ocorre quando a mistura de gases no interior da panela atinge a temperatura de $102,25^{\circ}\text{C}$, a partir deste ponto, de modo semelhante à primeira experiência, o sistema tendeu para o equilíbrio e ocorreu

uma redução da tensão gerada. No equilíbrio o sistema foi capaz de gerar uma tensão de 5,51 V.

O aumento do coeficiente de convecção do sistema através da adição da ventoinha de computador permitiu que a tensão gerada no sistema em equilíbrio sofresse um aumento de 317,4% e que o pico de tensão inicial sofresse um aumento de 8,2% . Este resultado sugere que caso exista convecção forçada sobre um sistema que apenas tenha uma fonte de calor em contacto com a temperatura ambiente, a geração de energia elétrica é plausível.

O objetivo do uso destes módulos é sempre melhorar a eficiência geral de um processo ou sistema, portanto caso seja necessário implementar convecção forçada na instalação dos módulos, terá de ser feito um balanço energético entre o consumo de energia do equipamento que gerará esta convecção e a energia elétrica ganha com a implementação do mesmo. Muito provavelmente este balanço energético será negativo.

A convecção forçada não tem de, necessariamente, ser imposta num sistema estático. O uso de módulos em veículos, onde a convecção forçada faz, intuitivamente, parte da natureza do sistema, pode ser bastante promissor já que evita completamente os custos da imposição de um escoamento sobre os módulos. Em termos do balanço energético do sistema, o que terá de ser estudado e analisado posteriormente será a diferença entre o acréscimo no consumo de combustível, pela adição do peso dos módulos ao sistema, e a energia gerada pelos mesmos. A meu ver, em veículos onde o peso está algumas ordens de grandeza acima do peso dos módulos, estes parecem ser os mais indicados para a instalação de um sistema de recuperação de energia térmica como este, embora não seja de descartar a hipótese de implementar em meios de transporte de dimensões menores.

É de referir que os módulos termoeletrônicos utilizados são de baixa gama e têm indicado nas suas especificações uma diferença de temperaturas máxima de 150° C. Em sistemas onde possa ocorrer diferenças de temperatura bastante superiores, gamas mais caras de módulos terão de ser usadas.

5.1.3 Experiência 3

Relativamente à experiência número 3, foi observado que antes do sistema atingir o equilíbrio térmico a tensão atinge um pico de 5,15 V e que o sistema em equilíbrio gera uma tensão de 3,44 V. Relativamente ao sistema sem ventoinha (Experiência 1), este sistema de retroalimentação demonstrou resultados bastante promissores já que a tensão gerada no equilíbrio sofreu um aumento de 160,6 %, embora o pico de tensão tenha sofrido uma redução de 18,7%. Comparativamente à experiência 2, a tensão em equilíbrio foi 37,57% menor já que a velocidade a que a ventoinha estava a operar era inferior causando por sua vez um coeficiente de convecção menor.

A observação mais saliente está no aumento irregular da tensão até atingir o pico. A linha vermelha marca o início de rotação do ventilador e coincide com uma quebra de tensão. Uns segundos antes desta quebra existe outra semelhante que penso que coincidirá com o início do motor elétrico, embora este não tenha a potência necessária para criar

movimento. A evolução da tensão antes e depois das quebras de tensão tem crescimentos diferentes, sendo o posterior menor, como esperado.

Sem os custos energéticos adicionais, foi demonstrado que a adição de uma ventoinha num sistema retroalimentado, permitiu um aumento substancial da tensão gerada em equilíbrio térmico. De notar que as dimensões da ventoinha eram de 120x120mm enquanto que os módulos apenas tinham na sua totalidade 80x80mm, isto indica que caso a área de convecção forçada fosse completamente coberta por módulos *peltier* a eficiência deste sistema retroalimentado seria superior.

Novamente, terá de ser feito uma comparação energética entre um sistema sem ventilador e um sistema retroalimentado por uma.

Outra observação que pode ser feita destes resultados é que um sistema deste género tem uma capacidade de dissipar calor muito alta comparativamente a outros sistemas estáticos onde não seja usada uma fonte de energia externa.

A meu ver, esta montagem tem enormes potencialidades em sistemas de aquecimento como por exemplo, salamandras, lareiras, aquecimento central e aquecedores a óleo. Ao instalar módulos numa destas fontes de calor irá resultar numa alteração desprezável na condutividade térmica do equipamento, mas possibilitará a inclusão de um ventilador sem o custo elétrico acrescido. Isto permitirá uma taxa de difusão de calor mais acentuada na divisão, o que por sua vez, levará a uma climatização mais rápida. Caso a divisão seja de grandes dimensões e haja um número reduzido de fontes isto poderá ser uma opção vantajosa.

5.2 Experiências com o Reóstato

Numa observação inicial podemos concluir que as experiências com apenas 1 módulo foram muito menos precisas que as de 4. Isto, provavelmente, deve-se ao facto de 1 só módulo ser muito mais sensível a alterações no fluxo de calor no interior da panela graças às correntes de convecção criadas.

5.2.1 Experiências com 1 módulo

Nos ensaios efetuados com as condições da experiência 1, podemos concluir que a potência máxima ocorre quando a resistência da carga atinge os 4,82 Ω , enquanto que nos ensaios, com as condições da experiência 2, atinge os 4,22 Ω . Os valores médios da potência são, respetivamente, 0.0094 W e 0.1328 W.

Esta variação da resistência interna é mínima e encontra-se dentro do esperado. Pode-se afirmar que a resistência interna deste módulo será de $4,62 \pm 0,3\Omega$. No entanto, como não foram atingidas diferenças de temperaturas muito elevadas nem tiradas mais medições, esta caracterização é pouco exata.

A potência retirada de um módulo, para um $\Delta T = 21$ (experiência 2), é parecida a outros trabalhos realizados com módulos de capacidade semelhante [29][30].

O valor de potência máxima alcançado na experiência 1 realça, novamente, que diferenças de temperaturas baixas (inferiores a 10°) não são suficientes para tornar esta tecnologia viável nem rentável. Entre uma fonte de calor a rondar os 100C e a temperatura ambiente, o uso destes módulos sem convecção forçada parece impraticável.

5.2.2 Experiências com 4 módulos

Nos ensaios efetuados com as condições da experiência 1, podemos concluir que a potência máxima ocorre quando a resistência da carga atinge os 17,82 Ω , enquanto que nos ensaios, com as condições da experiência 2, atinge os 17,78 Ω . Os valores da potência são, respetivamente, 0,028 W e 0,397 W.

Esta variação da resistência interna é mínima e encontra-se dentro do esperado. Pode-se afirmar que a resistência interna deste sistema de 4 módulos será de $17,79 \pm 0,03\Omega$. No entanto, como não foram atingidas diferenças de temperaturas muito elevadas nem feitas mais medições, esta caracterização é pouco exata.

A variação da resistência interna dos 4 módulos entre as 2 condições experimentais foi uma ordem de grandeza inferior à do módulo sozinho, este aspeto realça novamente a falta de precisão da montagem e do reóstato.

Muito provavelmente o valor médio e tolerância da resistência seriam umas décimas diferentes, caso fossem feitas mais medições para diferenças de temperatura maiores.

A potência máxima é inferior ao quádruplo da potência individual de um módulo.

O valor da resistência interna do sistema de 4 módulos é bastante semelhante ao quádruplo da resistência de apenas 1 módulo, isto confirma o princípio físico da soma de resistência em série. Esta diferença poderá ser graças às ligações elétricas e à incerteza da montagem experimental.

O valor de potência máximo alcançado na experiência 2, pelo contrário, já indica que diferenças de temperatura medianas (entre os 30° e os 40°) já são capazes de tornar esta tecnologia viável. Entre uma fonte de calor (100C) e a temperatura ambiente, o uso destes módulos com convecção forçada parece praticável.

APLICAÇÕES

6.1 Levantamento de produtos no mercado

Na tabela 6.1 é apresentado o trabalho que resultou do levantamento da informação relevante sobre os fornecedores de módulos termoeletricos dedicados à geração elétrica. Em cada linha está representado um módulo e as suas características mais relevantes.

As empresas produtoras destes módulos são maioritariamente Americanas, Canadianas e Chinesas. No entanto, estas empresas já possuem locais de fabrico e distribuição na Europa e noutros locais na Ásia.

O preço é largamente influenciado pela potência que o módulo consegue gerar e pelas temperaturas que consegue atingir. Porém, estes não são os únicos fatores que têm uma importância considerável, o revestimento protetor dos módulos é também um fator determinante.

Tendo em conta a variação esperada das resistências interna, alguns dos fornecedores mencionados na tabela 6.1 apresentam o intervalo que a resistência interna do módulo se encontrará. Outros fornecedores apenas apresentam um valor sem toleranciamento, ou nem apresentam sequer, isto demonstra que parte do mercado ainda é jovem e carece das informações técnicas necessárias.

Uma grande maioria dos fornecedores, destes módulos, avisam o consumidor que os fios de ligação não conseguem suportar as temperaturas indicadas para os módulos, mesmo com o revestimento que lhes é conferido. Os fios nunca deverão entrar em contacto direto com a fonte de calor caso esta seja superior ao limite estipulado. Um revestimento adicional terá de ser usado caso as temperaturas excedam os limites dos cabos de ligação e isto trará custos extra de instalação de um gerador.

Tabela 6.1: Tabela de características dos diversos módulos termoeletrônicos, para geração elétrica, disponíveis no mercado.

Empresa	ΔT_{max}	$T_{max}(^{\circ}\text{C})$	$q_{max}(\text{W})$	Preço(\$)	Dimensões(mm)	$R_{int}(\Omega)$
ELDOER	100	150	$\approx 0,3$	3	40x40x3,4	NE*
Alikafeii	100	150	$\approx 0,3$	2	40x40x3,4	NE
Thermal Electronics Corp.	170	230	3	29	40x40x5,4	
	270	300	5,2	25	30x30x6,2	2.7-5.4
	270	300	7,1	32	40x40x5,4	0.8-1.8
	270	300	14,7	50	56x56x6,2	0.5-1.2
	330	400	21,7	69	56x56x6,2	0.42-0.97
	415	600	1,3	800	9x21x5	0.03-0.08
	575	600	58	5000	85x42x5	0.73-1.22
	750	850	12,3	375	64,5x64,5x8,6	2.7-3.38
II-VI Marlow	180	230	2,71	31	34x30x3,9	4.47 – 5.69
	180	230	4,05	22	34x30x3,3	2.76-3.41
	180	230	6,16	29	44x40x3,5	1.95-2.38
	180	230	7,95	38	44x40x3,5	1.36-1.69
TEG PRO	200	230	0,84	12	21x18x5	6.9
	270	300	9,8	26	40x40x5	1.59
	270	400	5,7	21	30x30x5	2.93
	270	400	21,6	56	56x56x5	2.4
Hi-Z	200	250	2,3	29	35x32x4,7	2.5 - 4
	200	250	15	38	64x64x2	0.1 - 0.16
	200	250	21	83	75x75x2,3	0.15-0.25

* NE - Não especificado

Apenas algumas empresas vendem módulos termoeletrônicos especializados para a geração elétrica, mas existe uma quantidade e diversidade muito superior de módulos termoeletrônicos para o arrefecimento, utilizando o efeito *Peltier*. Nas fichas técnicas dos fornecedores destes módulos estão indicadas especificações diferentes das mencionadas na tabela 6.1. Como os módulos são vendidos com o propósito de arrefecimento, é indicado a corrente e tensão máximas que o módulo consegue suportar, bem como o gradiente térmico máximo que se consegue atingir.

Esta informação é irrelevante para quantificar a qualidade de um módulo quanto à sua capacidade de geração energética. No entanto, como o efeito *Peltier* é reversível, todos estes módulos têm a capacidade de agir como geradores em vez de arrefecedores. Existe a possibilidade que alguns destes tenham propriedades satisfatórias de geração que se encontrem por descobrir e testar. Isto pode abrir as portas para o rápido crescimento desta indústria.

Num estudo feito pela empresa *Statistics MRC*, o mercado global de geradores termoeletrônicos, em 2016, vale perto de 250 milhões de dollars e é esperado que o mercado duplique o seu valor até 2022. [31]

Esta empresa afirma que a falta de sistemas energeticamente eficientes e o grande tempo de vida e baixa manutenção têm impulsionado o mercado. Todavia, a falta de

conhecimento nesta área tem sido o maior travão de crescimento. A recuperação de calor residual/desperdiçado é o maior segmento do mercado.

6.2 Potenciais locais de instalação

Para os módulos com capacidade de suportar altas temperaturas, as indústrias química e metalúrgica parecem ideais. O revestimento dos equipamentos a alta temperatura poderá significar o reaproveitamento de grandes quantidades de energia, mesmo não existindo convecção forçada.

Em centrais elétricas a colocação de geradores termoelétricos no seu respetivo sistema de refrigeração também parece uma boa abordagem. As temperaturas aí atingidas são menores do que outras indústrias mas a possibilidade de existir convecção forçada, por parte dos fluidos refrigerantes, torna este local atrativo.

Em sistemas de transporte a zona de escape dos motores de combustão também tem imenso potencial. Seja em pequenos veículos, como um carro, ou em grandes, como um cruzeiro. Neste local existirá uma grande temperatura e convecção forçada.

Toda a indústria que requer grandes quantidades de calor pode e deve ser avaliada como potencial local de instalação destes geradores. Estes módulos devem ser logo tomados em conta ao projetar novas maquinarias no desenvolvimento destas indústrias.

6.3 Caso de estudo

No presente caso de estudo, o objetivo será determinar os custos e dimensões de um gerador 1 kW de potência. Usar-se-ão os módulos de baixa qualidade e a diferença de temperatura será também baixa.

Definimos que as condições de funcionamento deste gerador permitem um ΔT de aproximadamente 35° nos módulos. É assumido que o gerador se encontra bem projetado, ou seja, que a sua resistência interna tem um valor muito semelhante ao da sua carga.

Este gerador será instalado numa indústria que não fará paragens na sua atividade. Paragens esporádicas para manutenção não serão levadas em conta.

Os módulos escolhidos seriam de uma gama e qualidade semelhantes aos testados anteriormente. Uma estimativa indica que se conseguirá gerar 0,35 W por módulo. Este valor está em concordância com os resultados alcançados e com outros trabalhos [28].

Para se gerar 1 kW de potência nestas condições serão necessários,

$$\frac{1000}{0,35} \approx 2860 \text{ módulos}$$

A área ocupada por este gerador será então de,

$$A = 0,04 \times 0,04 \times 2860 = 4,576 \text{ m}^2$$

O preço de um módulo foi 2,5 €. No entanto ao se adquirir uma quantidade bastante elevada de módulos o preço, logicamente, descera. Em vendedores por grosso o preço pode chegar até alguns centimos, mas por segurança assume-se que cada módulo será adquirido a 1€.

Será necessário adquirir alhetas para colocar sobre os módulos para que a diferença de temperatura se consiga atingir. Um custo de 2000€ para dissipadores de calor de alumínio, suficientes para cobrir a área do gerador, parece ser um preço em conformidade com os valores encontrados no mercado atual.

Serão necessários mais materiais, transporte dos mesmos e trabalho humano para a montagem do gerador. É também assumido um valor de 2000€ para estes custos, trazendo assim o total para,

$$\text{Custo de instalacao} = 2000 + 2000 + 2860 = 6860 \text{ euros}$$

O tempo de vida destes módulos ronda as 200 000 horas, mas como estes são de baixa gama podemos assumir que o seu tempo de vida estará a rondar as 150 000 horas ($\approx 17\text{anos}$).

A manutenção com o gerador será nula ou muito reduzida, mas assumindo que terá um custo anual de 100€, trará o custo do gerador para,

$$\text{Custo instalacao e manutencao} = 6860 + 17 \times 100 = 8560 \text{ euros}$$

Para se conseguir determinar o tempo de retorno do investimento inicial da instalação de um gerador é necessário primeiro saber o preço médio a que kW de energia é comercializado. Como pode ser observado na figura 6.1, o preço, de ano para ano, não é constante nem demonstra nenhuma tendência. No entanto, isto já permite que seja feita uma estimativa.

	Electricity prices (per kWh)					
	Households ⁽¹⁾			Non-Household ⁽²⁾		
	2015s1	2016s1	2017s1	2015s1	2016s1	2017s1
EU-28	0.209	0.205	0.204	0.121	0.116	0.114
Euro area	0.220	0.218	0.220	0.126	0.122	0.121
Netherlands	0.199	0.162	0.156	0.090	0.086	0.082
Austria	0.201	0.203	0.195	0.104	0.103	0.093
Poland	0.144	0.133	0.146	0.088	0.081	0.088
Portugal	0.228	0.235	0.228	0.114	0.113	0.115
Romania	0.130	0.126	0.120	0.083	0.076	0.077
Slovenia	0.159	0.162	0.161	0.083	0.085	0.078
Slovakia	0.151	0.142	0.144	0.113	0.109	0.115
Finland	0.155	0.154	0.158	0.071	0.069	0.067

(¹) Annual consumption: 2 500 kWh < consumption < 5 000 kWh.

(²) Annual consumption: 500 MWh < consumption < 2 000 MWh.

Figura 6.1: Tabela com o preço médio do kW por ano em alguns países da zona europeia[32]

Assumindo que estamos na Europa, o preço médio do kWh será de 0,121 €. Logo, o tempo em operação contínua necessário para que o investimento seja recuperado é de aproximadamente,

$$\frac{8560}{0,121} = 70744 \text{ horas} = 2948 \text{ dias} \approx 8 \text{ anos}$$

Por outras palavras, o tempo necessário para que o custo da energia gerada por este gerador fosse igual à media actual europeia será de 8 anos. Isto pode ser observado na figura 6.2.

Obviamente que o preço do kWh sofrerá bastantes alterações, mas as estimativas são promissoras e indicam que o investimento se pagará em metade do tempo de vida do equipamento.

Na figura 6.2 é apresentado o preço da eletricidade em função do tempo de operação deste hipotético gerador.

Como a eficiência dos módulos é maior quanto maior for a diferença de temperatura, numa situação mais difícil de alcançar onde os módulos estivessem submetidos a um ΔT de 70° a potência de cada um rondará o 1,1 W. [28]

No gerador previamente imaginado, se cada módulo gerasse 1,1 W obteríamos,

$$Potencia = 2860 \times 1,1 = 3146 \text{ W}$$

O que levaria, aproximadamente, ao triplo da potência gerada e por sua vez a um tempo de retorno do investimento inicial de aproximadamente 2,5 anos.

Em 1998 foi efetuado um trabalho onde foi feita a mesma estimativa, mas para um $\Delta T = 65$. Os resultados, que são apresentados na figura 6.3, sugerem que existiu uma melhoria na qualidade dos módulos nos últimos anos.

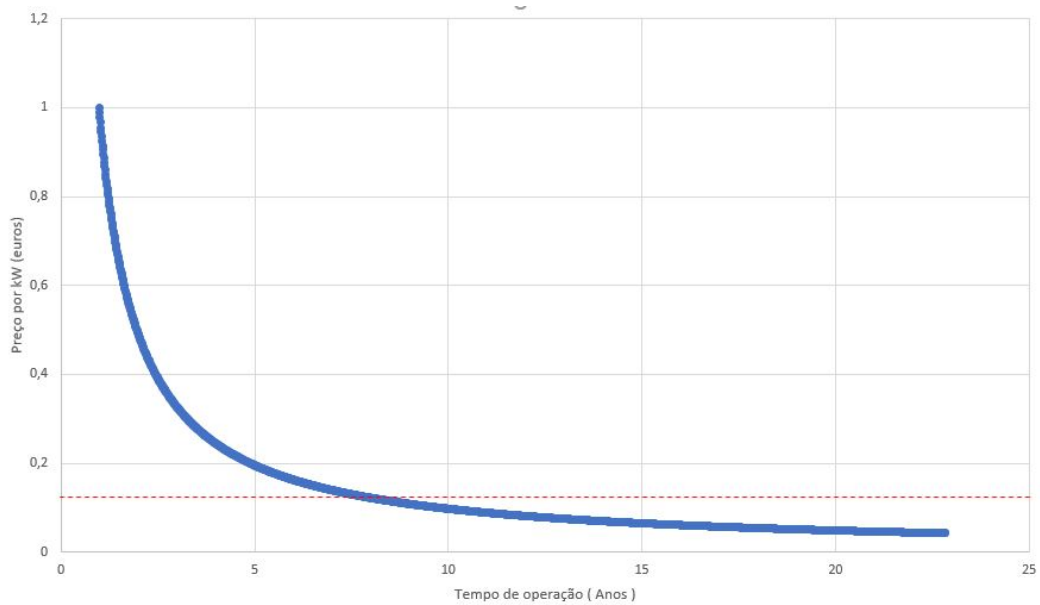


Figura 6.2: Custo do kW em função do tempo de operação do gerador a um $\Delta T \approx 21$. A linha tracejada a vermelho representa o preço médio europeu do kW em 2017.

Isto porque a estimativa feita não teve em conta os custos de construção e manutenção e mesmo assim apresentou um tempo de retorno semelhante à minha estimativa, efetuada anteriormente. [29]

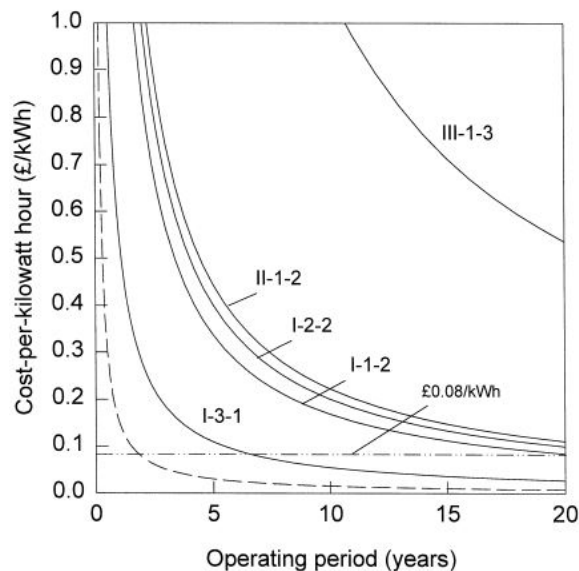


Figura 6.3: Custo do kW em função do tempo de operação de diferentes módulos a um $\Delta T = 65$. A linha tracejada representa um módulo de qualidade superior num $\Delta T = 100$ [29]

A temperatura ambiente terá uma forte influência sobre a potência que um gerador

conseguirá alcançar. Em países com uma grande amplitude térmica entre estações existirá uma discrepância acentuada nas capacidades do gerador entre o verão e o inverno.

Caso o sistema esteja mal projetado a sua potência poderá reduzir em cerca de 50%, portanto é importante realçar novamente que o Teorema de máxima transferência de potência seja respeitado.

CONCLUSÃO

Uma reflexão geral sobre a montagem leva-me a concluir que esta poderia ter sido efetuada de uma maneira diferente. Caso os termopares fossem colocados diretamente na superfície dos módulos não seria necessários todos os cálculos auxiliares e estimativas para a obtenção dos mesmos. A montagem tem um grau elevado de complexidade e o uso repetitivo da mesma levará à deterioração de certos componentes. Esta deterioração influenciará os resultados, ou seja, certos aspetos da construção da montagem poderão ser melhorados.

Porém, tendo em conta que foram efetuados poucos ensaios, a montagem pareceu ser um método eficaz de testar os módulos quanto à sua resistência interna e potência em baixos gradientes de temperatura.

A montagem foi realizada na vertical, caso esta fosse efetuada na horizontal alguns problemas relacionados com o escoamento livre poderão surgir.

Uma reflexão sobre os resultados leva-me a concluir que tem vindo a existir uma melhoria significativa da qualidade dos módulos e que, embora estes tenham eficiências extremamente baixas, devem começar a ser introduzidos na indústria já que a longo prazo o uso dos mesmos parece ser economicamente viável.

A progressão da tecnologia é feita com passos de bebé, ou seja, o acréscimo desta tecnologia pode ser insignificante numa pequena escala, mas se o acréscimo destes módulos numa indústria melhorar a sua eficiência em 1%, isto poderá significar uma poupança de milhares de euros.

7.1 Trabalhos Futuros

Como o método de teste apenas retrata uma situação de montagem existe uma margem de progressão bastante ampla para o trabalho aqui realizado. Testes experimentais mais fiáveis, variáveis e concretos poderão ser elaborados.

A montagem de módulos numa potencial aplicação e posterior medição da potência gerada parece-me ser o caminho lógico a seguir. Associada a esta montagem deve ser feito um estudo mais detalhado sobre o melhor método de montagem dos módulos.

A potencial aplicação a seguir primeiramente deve ser uma que não exceda um ΔT de 100°C para que apenas seja necessário usar os módulos de menor custo. A projeção de um equipamento em vez da adaptação pode ser uma ideia a seguir.

Está também aberta a porta para se estudar qual será a melhor forma de gerir a energia gerada pelos GTEs ou até mesmo integrá-los na rede energética. Os problemas encontrados deverão ser semelhantes aos dos painéis solares fotovoltaicos, mas ainda assim é uma área de estudo vasta.

Dentro da área das ciências dos materiais penso que existam 2 aspetos fundamentais nos quais deverá ocorrer uma continuação de estudos. Estes são a melhoria dos processos de fabrico e da eficiência dos materiais semicondutores.

Caso exista a descoberta de um novo processo de fabrico ou a melhoria do atual, o preço dos módulos poderá descer o suficiente para tornar o uso dos mesmos indispensável na indústria.

Os módulos com capacidades de suportar altas temperaturas e gerar quantidades elevadas de potência já existem, só que o preço impede qualquer viabilidade de uso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Shur. *Physics of Semiconductor Devices*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1990. ISBN: 0-13-666496-2.
- [2] D. Lowe. “Electronic Basics: What is a Semiconductor?” Em: *dummies, A wiley brand* (2012).
- [3] D. Rowe. *Handbook of Thermoelectrics*. CRC Press - Taylor & Francis Group, 1995. ISBN: 9780849301469. URL: <https://www.crcpress.com/CRC-Handbook-of-Thermoelectrics/Rowe/p/book/9780849301469>.
- [4] A. Campilho. *Instrumentação Electrónica. Métodos e Técnicas de Medição*. Second. FEUP Edições, 2013. ISBN: 978-972-752-163-0. URL: <https://feupedicoes.fe.up.pt/book/9789727521630>.
- [5] H. J. Goldsmid. *The Physics of Thermoelectric Energy Conversion*. 2053-2571. Morgan & Claypool Publishers, 2017. ISBN: 978-1-6817-4641-8. DOI: 10.1088/978-1-6817-4641-8. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/978-1-6817-4641-8>.
- [6] J. W. F. Science. *Electricity from Heat: Thermoelectric Generators*. 2013. URL: <https://scifundchallenge.org/firesidescience/2013/10/14/electricity-from-heat-thermoelectric-generators-2/>.
- [7] S. Rühle. “Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells”. Em: *Solar Energy Consulting* (2016).
- [8] A. B.F. D. & e G. Siefert. *Concentrator Photovoltaics - 4. Multijunction Concentrator Solar Cells*. Vol. 4. Springer. ISBN: 0342-4111.
- [9] N. R.E. L. NREL. *Best Research-Cell Efficiencies*. URL: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>.
- [10] J. Carvalho. *Transferência de Calor e Eficiência Energética*. NOVA Editorial FCT, 2017. ISBN: 979-989-99528-2-9.
- [11] V. S. Arpaci. *Introduction to Heat Transfer*. Vol. 1. Prentice Hall, 1999. ISBN: 0-13-391061-X.
- [12] H. Electrovo. *WHAT IS THERMOELECTRIC COOLING?* 2013. URL: <https://electrovo.co.uk/what-is-thermoelectric-cooling/>.

- [13] A. R. K. Andrea Montecucco Jonathan Siviter. "The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel". Em: *ELSEVIER - Applied Energy* (2014).
- [14] Y. A. Çengel. *Heat and Mass Transfer - A Practical Approach*. third. New York: McGraw-Hill., 2006.
- [15] S. Sharma. *A Review of Thermoelectric Devices for Cooling Applications*. Vol. 11. Taylor & Francis: International Journal of Green Energy, 2014.
- [16] R. McCarty. *Thermoelectric Power Generator Design for Maximum Power: It's All About ZT*. Vol. 42. Springer, Journal of Electronic Materials, 2013.
- [17] D. Champier. *Thermoelectric generators: A review of applications*. ELSEVIER, Energy Conversion e Management, 2016.
- [18] C. R. B. GL. *U.S. space radioisotope power systems and applications: past present and future*. radioisotopes - applications in physical sciences, 2011.
- [19] P. A.D.A. M. Pérez. "Computational and experimental study of a complete heat dissipation using water as a heat carrier placed on a thermoelectric generator". Em: *ELSEVIER - Energy* (2014). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.094>.
- [20] P. A.D.A. M. Pérez. "Experimental investigation of the applicability of a thermoelectric generator to recover waste heat from a combustion chamber". Em: *ELSEVIER- Energy* (2015). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.077>.
- [21] K. T.K.K.M.K.K.T. K. H. *Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works*. Vol. 43. Springer, Journal of Electronic Materials, 2014.
- [22] A. D. L.C. Ding A. Akbarzadeh. "Performance and reliability of commercially available thermoelectric cells for power generation". Em: *ELSEVIER - Applied Thermal Engineering* (1998).
- [23] D. T. R. e T. B. Jekel. *Heat Recovery in Industrial Refrigeration*. 2007.
- [24] M. S. J.P. Carmo Joaquim Antunes. "Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-dependence behavior". Em: *ELSEVIER, Measurement* 44 (2011).
- [25] E. E. M. Store. *SP1848 Thermoelectric Power generation Chart*. URL: https://ae01.alicdn.com/kf/UTB87_8cnqrFXKJk430vq6ybnpXaj.jpg?size=54926\&height=210\&width=800\&hash=13b6ac7c25044db90ee0dd0568a5c689.
- [26] A. Technologies. *estimating heat transfer coefficients*. URL: <http://www.altasimtechnologies.com/electronic-cooling/estimating-heat-transfer-coefficients/>.
- [27] D. Roncati. "Iterative calculation of the heat transfer coefficient". Em: *Progettazione Ottica Roncati, via Panfilio, 17 – 44121 Ferrara* ().

- [28] M. M. R. Dr. Steven O'Halloran. "AC 2012-3976: POWER AND EFFICIENCY MEASUREMENT IN A THERMOELECTRIC GENERATOR". Em: *American Society for Engineering Education* (2012).
- [29] G. M. D.M. Rowe. "Evaluation of thermoelectric modules for power generation". Em: *ELSEVIER - Journal of Power Sources* (1998).
- [30] C.-T.H.G.-Y.H.H.-S.C.B.Y.D.-J. Yao. "Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators". Em: *ELSEVIER - Applied Energy* (2011).
- [31] S. MRC. *Thermoelectric Generator - Global Market Outlook (2016-2022)*. 2016. URL: <http://www.strategymrc.com/report/thermoelectric-generator-market>.
- [32] E. Comission. *Electricity Prices (per kWh)*. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>.



CÓDIGO ARDUINO

```
#include <max6675.h>
#include <SPI.h>
#include "Adafruit_MAX31855.h"
//Termopar 1 (Temperatura Fria)
#define SCK_1  5
#define CS_1  3
#define SO_1  2
//Termopar 2 (Temperatura Quente)
#define SCK_2  8
#define CS_2  9
#define SO_2  10

float tempant1 ;
float tempant2 ;

Adafruit_MAX31855 thermocouple1(SCK_1, CS_1, SO_1);
Adafruit_MAX31855 thermocouple2(SCK_2, CS_2, SO_2);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  tempant1 = 0;
  tempant2 = 0;
  Serial.println("CLEARDATA"); //clears up any data left from previous projects
  Serial.println("LABEL,Data,Hora,Temperatura Quente,Temperatura Fria");
```

Figura I.1

```
}

void loop() {
  float temp1 = thermocouple1.readCelsius();
  float temp2 = thermocouple2.readCelsius();
  if (isnan(temp1)) {
    Serial.print("Temp Fria= ");
    Serial.print(tempant1);
    Serial.println(" erro");
  }
  else {
    Serial.print("Temp Fria= ");
    tempant1 = temp1;
    Serial.println(tempant1);
  }
  if (isnan(temp2)) {
    Serial.print("Temp Quente= ");
    Serial.print(tempant2);
    Serial.println(" erro");
  }
  else{
    Serial.print("Temp Quente= ");
    tempant2 = temp2;
    Serial.println(tempant2);
  }
}
```

Figura I.2

```
}
Serial.println("----");
Serial.println( (String) "DATA,DATE,TIME," + tempant2 + "," + tempant1 + ",");

delay(2000);
}
```

Figura I.3



LISTA DE MATERIAIS

1. Placa Arduino Uno e Cabo USB Tipo A para Tipo B (x1)
2. Fios Condutores (x20)
3. Termopar (x2)
4. Conversor MAX31855 Thermocouple-to-Digital (x2)
5. Fogão Elétrico (x1)
6. Panela de Aço Inox (x1)
7. Dissipadores de Alumínio anodizado preto 53*53*15 (mm) (x8)
8. Ventoinha de Computador(120 mm de diâmetro) e transformador12V (x1)
9. Chapa de Alumínio 50x50cm 1 mm (x1)
10. Módulo Peltier SP1848 (x4)
11. Multímetro (x2)
12. Tubo de Massa Dissipadora (x1)
13. Tubo de Silicone para Altas Temperaturas (x1)
14. Placa de cartão endurecido 90x90cm (x1)
15. Rolo de Fita Cola de Alumínio (x1)
16. Placa de Cortiça
17. Lã de ferro